

工學碩士 學位論文

渦流 衝突型 混合 裝置를 使用한  
물 混合 버너의 燃燒 特性

Combustion Characteristics in Burner Using Water  
Emulsified Fuel Produced by Swirl Impinging Mixer

指導教授 朴 權 夏

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

韓 鎭 熙

本 論文을 韓鎭熙의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委 員 長           尹   相   國   ①

委           員           趙   權   回   ①

委           員           朴   權   夏   ①

2003年   2月

韓國海洋大學校   大學院

機 械 工 學 科

韓   鎭   熙

# 目 次

## ABSTRACT

### I. 序 論

1.1 연구의 배경 및 목적 -----	1
1.2 선행연구 -----	3
1.2.1 물 혼합 연료 연소 특성 연구 -----	3
1.2.2 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상 연구 -----	6
1.2.3 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상 연구 -----	8

### II. 理論的 考察

2.1 물 혼합 연료 -----	11
2.2 물 혼합 연료의 연소 특성 -----	12

### III. 實驗裝置 構成 및 實驗 方法

3.1 실험 버너의 구성 및 실험 조건 -----	16
3.2 상용 버너의 구성 및 실험 조건 -----	21

#### IV. 實驗結果 및 考察

4.1 실험 버너의 연소 특성 -----	24
4.1.1 물 혼합 특성 -----	24
4.1.2 분무 특성 -----	26
4.1.3 온도 특성 -----	27
4.1.4 화염 특성 -----	32
4.1.5 배기 특성 -----	43

4.2 상용버너의 연소 특성 -----	47
4.2.1 열 효율 -----	47
4.2.2 배기 특성 -----	50

V. 結 論 -----	54
--------------	----

參考文獻 -----	55
------------	----

## ABSTRACT

Combustion Characteristics in Burner Using Water  
Emulsified Fuel Produced by Swirl Impinging Mixer

Jin-Hee Han

Department of Mechanical Engineering, Graduate School  
Korea Maritime National University  
Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

This paper addresses to the combustion characteristics in the burner using emulsified fuel newly produced with the swirl impinging mixer just before ejecting without any surfactant. According to international agreement, the restriction of exhaust emissions of the industrial burner, for instance NO<sub>x</sub>, PM etc, is getting stricter for the environmental conservation. As a countermeasure of these, the emulsified fuel, which is water and oil mixture, is one of the measures.

The emulsified fuel is made into fuel drops of uniform size, 10~20 $\mu$ m, using swirl impinging mixer without surfactant. The characteristics of combustion, exhaust, and efficiency are analysed in this paper.

As a result, the emulsified fuel applied to a burner makes the flame length short and reduces excessive air. NO<sub>x</sub> and PM are also reduced up to 30% and 90% respectively. If the amount of exhaust emission is remained at the same level the fuel efficiency can be better by 4%.

# I. 序 論

## 1.1 연구의 배경 및 목적

쾌적한 생활에 대한 요구와 환경에 관한 관심 증대로 환경 오염에 대한 규제가 점점 더 강화되고 있다. 하지만, 전체 에너지의 대다수를 차지하고 있는 화석 연료는 유해한 배기가스의 방출이 불가피하다.

특히, 질소 산화물은 2004년부터 새로이 시행될 환경부 기준에서 엄격하게 규제된다. 예를 들면, 대형 일반 보일러의 경우 250ppm 이하에서 신규 시설은 70ppm 이하로 강화되며, 발전용 가스터빈이나 디젤 기관은 기존, 신규 모두 강화되어 950ppm에서 기존 250ppm, 신규 70ppm이하로 상당 양의 질소 산화물 감축을 요구하고 있다. 입자상 물질의 경우도 대형 보일러 40mg/Nm<sup>3</sup>에서 20mg/Nm<sup>3</sup>, 소형 보일러 150mg/Nm<sup>3</sup>에서 100mg/Nm<sup>3</sup>, 발전용 시설도 40mg/Nm<sup>3</sup>에서 20mg/Nm<sup>3</sup>로 두 배의 감축을 요구하고 있다.

이러한 현실 하에 질소산화물(NOx)과 입자상 물질(PM)을 줄이려는 많은 연구가 진행되고 있으나, 연료의 양질화 및 화로 부하의 경감을 제외하고는 질소 산화물과 PM을 동시에 저감하는 데는 많은 어려움이 있다. NOx를 억제하기 위해서는 연소 초기 영역의 산소농도, 화염 온도를 낮게 유지하고, 연소 가스의 고온 체류 시간을 짧게 하여야 한다. 기술로는 공기 2단 연소, 비평형 연소, 박막화염 연소, 물/증기 취입, 물 혼합 연료 사용, 배기 재 순환(EGR) 등이 있다. 이들 기술은 대부분 질소산화물 저감을 위하여 활발한 연소를 억제하기 때문에 불완전 연소에 의한 PM의 증가를 동반하게 된다.

하지만, 물 혼합 연료를 사용하면 연료, 물 혼합 액적의 미세 폭발 효과에 의한 연소 특성 향상과 질소산화물과 PM을 동시에 저감하는 효과가 있다. 이러한 장점에도 불구하고 일반적으로 매우 부정적인 입장이 많은데, 이는 물 혼합에 의한 연소의 불안정, 분사계 및 연소실의 부식 등을 들 수 있다. 특히, 과거의 정교하지 못한 기술 적용 사례들에 의하여 이러한 불신이 증가되었다고 할 수 있다. 연소 불안정의 문제는 물 혼합율을 적절히 제어하지 못하고, 혼합되는 물 액적의 크기가 너무 큰 경우이다. 분사계 및 연소실의 부식 문제 역시 물 액적이 큰 경우와 물과 연료의 혼합 상태가 불량하여 충분한 연소가 이루어지지 못한 경우에 발생된다.

질소산화물과 PM 배출을 동시에 저감하기 위해서는 상반되는 연소 특성을 개선할 수 있는 물 혼합 기술이 효과적인 대안으로 생각된다. 이런 면에서 볼 때 2004년부터 적용될 환경부 배출 허용기준에 만족하는 보일러를 생산하기 위해서는 물 혼합 연료의 사용이 불가피 할 것으로 보여지며, 버너에서의 물 혼합 연료 기술의 개발이 필요하다. 하지만, 현재의 물 혼합 기술은 기계적 교반과 초음파를 이용하여 연료와 물을 혼합하고, 혼합된 물 혼합 연료의 안정화를 위해 계면 활성제를 사용한다. 이로 인해 장비의 크기와 비용이 커지고, 유지관리 비용이 추가로 계속 들어가는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 위의 단점들을 보완하기 위하여 계면활성제를 사용하지 않고 크기를 줄인 와류충돌형 혼합장치를 제작하고, 이때 생산된 물 혼합 연료를 실험용 및 상용 버너에 적용하여 각종 연소 특성을 분석하고자 한다.



## 1.2 선행 연구

### 1.2.1 물 혼합 연료 연소 특성 연구

액적의 점도, 주위 조건, 물 혼합량, 유화제의 사용 여부 등에 따라 물 혼합 연료의 주요 연소 특성을 결정하는데, 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

미세 폭발은 연료 속에 포함된 물 액적이 열을 흡수하여 과열 상태가 되어 증기압이 물 액적 둘레를 싸고 있는 연료 막의 표면 장력보다 커지면 순간적으로 매우 작은 액적으로 분리되어 넓게 퍼지면서 빠르게 연소가 진행되는 것을 말한다.

미세 폭발과 물 혼합량과의 관계에 대한 연구로 Kajitani 등은 물 20%에서 가장 급격히 액적 크기가 증가되어 높은 미세 폭발 가능성을 제시하였고[1], Mizutani 등은 유화제를 사용한 물 30%에서 연소 기간을 측정하여 미세 폭발을 증명하였으며[2], Park등은 유화제를 섞지 않은 30% 이하에서만 미세 폭발이 발생한다고 발표하였다[3].

물 혼합 액적의 크기에 대한 연구로는 Kimoto 등은  $10\mu\text{m}$  이상 큰 액적에서 부풀어오르며 터지는 미세 폭발을 관찰했으나,  $1\mu\text{m}$  이하의 작은 액적이 일 경우는 단지 부푼 후 분리만 되어 미세 폭발 현상이 없는 것을 관찰하였다[4]. Vedruchenko는 유화제를 사용한 물 10, 20%에서는  $10\mu\text{m}$  이하의 액적 일 경우만 폭발하며 30%이상에서는  $10\mu\text{m}$  이상의 액적들만 미세 폭발이 발생하는 것을 보여주었다[5].

계면 활성제가 미세 폭발에 미치는 영향에 관한 연구로는 Park등이 계면 활성제를 사용하지 않는 조건에서만 미세 폭발이 발생한다고 하였으며[3], Yoshimoto 등은 계면 활성제를 최대한 적게 섞어야 한다고 지적하였다[6].

일반적으로 계면 활성제는 액적의 표면 장력을 증가시켜 미세 폭발에 부정적 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

연료의 종류로 보면 Altenkrich 등은 저질유 일수록 폭발시간이 더 길어진다고 하였다. 이는 연료 점도의 증가에 의한 것으로 저질유에서 더욱 큰 미세 폭발 효과를 볼 수 있을 것으로 예상하였다[7].

미세 폭발의 위치에 관한 연구로 Mizutani 등이 버너에서는 화염 초기, 중기에서 미세 폭발이 발생한다고 하였지만[2], Park 등은 엔진에서의 미세 폭발은 연소 화염 하단 부분에서 발생하는 것으로 보고하였다[8]. 이는 버너에서는 미세 폭발이 발생할 주위 온도와 압력의 조건이 일찍 발생하나 엔진에서는 착화 지연 기간 증가의 결과로 보여진다. Fig. 1.1은 Park 등의 실험 결과로 물 혼합 연료를 사용한 (b)의 연소 하단에서 미세 폭발 현상을 잘 보여주었다[8].

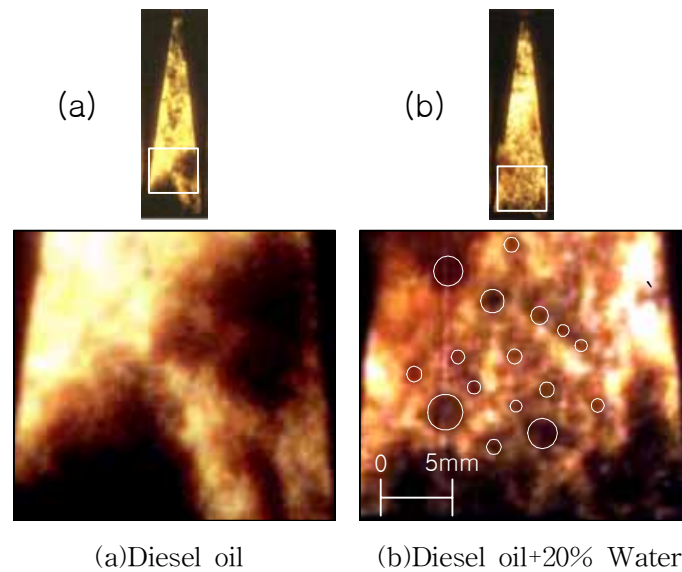


Fig. 1.1 Micro explosion in diesel engine

요약하면 미세 폭발은 계면 활성제를 적게 사용하고, 물의 양은 대략 20~30%, 물 액적의 크기는 약  $10\mu\text{m}$ , 저질유의 조건 일 때 효과적으로 미세 폭발이 일어날 것으로 보인다. 이러한 조건 아래서의 효과적인 미세 폭발은 작게 미립화 된 액적들이 넓은 지역에서 빠르게 연소가 이루어지므로 연소 특성의 향상을 가져오며, 국부적인 온도 상승을 막아주고, 동시에 물 증발에 의한 화염 온도를 저감하기 때문에 효율과 질소산화물 및 PM을 동시에 저감할 것으로 생각된다.

## 1.2.2 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상 연구

현재 물 혼합 연료를 버너에 사용할 경우 NO<sub>x</sub>, PM 등 배기가스의 저감과 수증기의 배출 손실, 미세 폭발 효과 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Mitsubishi에서는 중유에 40%의 물을 혼합하여 NO<sub>x</sub> 50%를 저감했으며[9], Gollahalli 등은 중유에 물을 20% 혼합 사용하여 NO<sub>x</sub>의 양에는 변화가 거의 없었지만, PM은 상당량 감소시켰다[10]. 모두 CO<sub>2</sub>는 많아지고 O<sub>2</sub>의 배출이 감소하였는데 이는 연소 활성화의 결과로 보여진다.

석탄용 보일러의 경우도 Rawlins 등에 의해 물 혼합 30%로 NO<sub>x</sub>를 180~750ppm 감소하였으며[11], Liu 등은 46%의 물 분사로 NO<sub>x</sub>를 20% 감소시키고, O<sub>2</sub> 감소, CO<sub>2</sub>를 증가시켜 연소 활성화의 효과를 보여 주었다[12]. Jahani 등이 구성이 버너와 비슷한 항공기 엔진에서 유화제를 사용한 물 혼합을 실험한 결과 PM을 초기에 많이 감소시켰지만 기타 큰 차이를 보여주지는 못하였다[13].

효율의 경우 Gollahalli 등이 중유에 물 14%를 혼합함으로써 온도 40~103K 감소, 열 발생율의 저하를 보고하였고[10], Rawlins 등은 석탄에 30%의 물을 혼합하여 swirl을 증가시키고, 연소 효율을 상승시켰다[11]. Liu 등은 석탄에 물 20%를 주입함으로써 200℃의 온도 감소로 연소 효율이 2~8% 감소하였다고 보고하였다[12]. 항공기 엔진에서는 Jahani 등이 5.8% 물 혼합에서 효율이 조금 올라가지만 이후에는 열 발생율이 떨어지는 것으로 보고하였다[13]. Mitsubishi에서는 중유에 물 40% 사용시 NO<sub>x</sub> 개선 비용 50%를 절감하고, 효율은 3% 떨어지는 것을 발표하였으며[9], Hiroyasu 등은 물 20%까지 연소효율이 상당히 (5~10%) 좋아지다가 이후 급격히 감소하는 것을 보고하였고, 물 혼합양에 따라 blow out이 생기는 지점이 다르므로 풍속 및 연료량의 가, 감을 적절히

조절할 필요성을 제시하였다[14].

대체적으로 버너에서의 물 혼합 효과는 NO<sub>x</sub>와 PM등 배기가스를 줄일 수 있으며, 버너 구동 조건들을 적절히 조절하면 많은 양의 배기 유해물질을 줄이면서 효율도 유지하거나 약간 향상된 결과를 가져오는 것으로 보여진다.

### 1.2.3 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상 연구

엔진에 NO<sub>x</sub>와 PM을 줄이기 위해 물을 사용하는 방법은 엔진에 물을 직접 분사하는 방법, 흡입 manifold에 분사하는 방법, 물 혼합 연료를 사용하는 방법이 있다.

물을 직접 실린더 내로 주입하는 연구로는 Kohketsu 등이 물을 분사하여 NO<sub>x</sub> 50%, PM 25%의 저감 효과를 보았으며[15], Svahn은 물 30%이하에서 NO<sub>x</sub> 40~60%의 저감 효과를 보았다[16]. 흡입 manifold에 물을 분사하는 연구는 Hambright 등이 흡입 관에 물을 분사하여 NO<sub>x</sub>는 매우 감소, HC, SOF는 적은 양 감소하였지만 PM은 오히려 증가하는 결과를 가져왔다[17]. 그러나, Ishida 등은 NO<sub>x</sub>와 PM을 동시에 저감했다고 발표하였다[18].

물 혼합 연료를 사용한 연구는 Afify가 NO<sub>x</sub>는 감소하되 HC는 증가하는 결과를 보고하였고[19], Yoshimoto 등은 유화연료로 NO<sub>x</sub>, PM은 크게 감소하였지만, CO, HC는 소량 증가하고 30%에서 좋은 결과를 보여주었다[20]. Yoshimoto 등도 물 51%로 NO<sub>x</sub>를 40% 저감했으며 PM에 대해서도 좋은 결과를 얻었다[21]. O'Neel 등은 NO<sub>x</sub> 10.4%, PM 28.4%를 감소시켰지만, HC 32.2%, CO 65.3% 증가하는 결과를 보였다[22]. Caffatarr 등은 PM과 HC를 가장 줄일 수 있는 조건은 5%물과 3.5%유화제를 사용하는 조건을 제시하였으며[23], Andrews 등은 물 20%일 때 NO<sub>x</sub> 70% 감소, HC와 CO는 증가하고, 물 10%일 때 PM 80%, SOF 75%, 카본이 80% 감소하는걸 보고하였다[24]. Lawson 등은 유화제를 사용하지 않고 혼합했을 때 물 15%에서 NO 40~60%, CO 10%, HC 14% 감소를 보고하였다[25]. Miyamoto 등은 수치적으로 계산하여 물 양이 증가할수록 NO<sub>x</sub>와 PM은 급속히 감소하는 것을 발표하였다[26].

이외에도 Yoshimoto 등은 물 혼합 연료와 EGR을 동시에 사용하여 53%의 물 사용에서 NO<sub>x</sub>를 58% 저감했으며[27], Johnson 등은 알코올과 물을 연료에 동시에 혼합 사용하여 PM과 PM을 상당히 감소 시켰지만 HC, CO, SOF는 증가하는 결과를 보였고[28], Khan 등은 에탄올, 메탄올, 물을 각각 연료에 혼합하였을 때 물의 경우만 PM을 줄일 수 있다고 보고하였다[29].

엔진에서 물 혼합 연료의 효율은 물을 직접 분사하는 Kohketsu등의 경우 연료 소모율은 20%이하에서 같거나 비슷하고, 이후에는 증가한다고 하였으며[15], Svahn은 연료 소모율이 1~1.5% 증가되는 것을 보고하였다[16]. 흡입 관에 분사하는 Hambright 등은 흡기 manifold에 온도가 저하되어 체적 효율은 증가된다고 하였고[17], Ishida 등은 물 분사 비율만큼 효율도 비례(물 1%= 효율 감소 1%)하여 감소한다고 발표하였다[18].

물 혼합 연료를 바로 사용하는 경우 Park 등은 함수율 증가로 점화 지연이 증가하여 유화 연료의 효율이 향상되었고[18], Afify는 2000rpm에서 연료 소모율이 저감되었고[19], Yoshimoto 등은 40%까지의 물 혼합 연료에서는 연료소모율이 향상되나 이후로는 증가된다고 하였다[20]. Yoshimoto 등은 유화제 연료로 냉각 손실을 줄여 연료 소모율을 5~9% 향상하였으며[21], O'Neel 등도 물 혼합 연료로 연료 소모율을 저감하였다[22]. Yoshimoto 등은 EGR과 동시에 사용하였을 때도 연료소모율이 향상되고[27], Johnson 등은 알코올이 포함된 물 혼합이 엔진 운전성과 효율 향상을 가져왔다[28]. 하지만, Khan 등은 물과 에탄올이 포함된 연료가 연료 소모율을 증가시키며, 메탄올인 경우에는 연료 소모율을 5% 저감하였다[29].

엔진에서 물 혼합 연료의 사용으로 NO<sub>x</sub>는 모든 경우 줄어들지만 PM, CO, HC등은 감소 또는 증가되는 경우들이 있었다. 이는 엔진에서의 물 혼합은 착화 지연을 늦게 하여 적절한 시점에서 연소가 이루어지지 않기 때문이다. 하지만 분사 시점을 적절히 조절하면 배기가스의 감소와 연소 효율의 증가를 가져 올 것으로 기대된다.



## II. 이론적 고찰

### 2.1 물 혼합 연료

물 혼합 연료 연료는 크게 두 가지로, 수중 유적형 물 혼합 연료 연료와 유중 수적형 물 혼합 연료 연료가 있다. 수중 유적형 물 혼합 연료 연료는 액적 주위의 물이 연속 상으로 되어있어 장비내부의 부식 우려가 있고 점도가 큰 단점이 있다. 반면, 유중 수적형 물 혼합 연료 연료는 연료가 연속 상으로 되어있고 이 안에 물 입자들이 20~100 $\mu\text{m}$ 의 크기로 존재하게 되며 점도가 낮고, 미세 폭발이 잘 발생하여 일반적으로 많이 사용하고 있다.

물 혼합 연료 제조 기술은 물 입자의 크기, 점도, 안정성 등을 고려하여 기계적 방법, 화학적 방법, 초음파를 이용하는 방법 등이 있다. 기계적 방법은 impeller나 turbine 등으로 유체에 교반 및 전단을 이용하는 것으로 비용은 적게드나 물의 미립화와 안전성에 문제를 가지고 있다. 화학적 방법은 계면활성제를 사용하여 유체의 표면장력을 감소시켜 연료 속에 물의 침투를 용이하게 하고 상을 안정화시킨다. 초음파를 이용하는 방법은 연료와 물 사이에 초음파로 여러단 교차하여 발생시키면 cavitation이 발생하여 연료 속으로 물을 침투시키는 원리를 이용한다.

일반적으로 사용되는 기술은 기계적 회전력을 이용하여 연료 속으로 물을 침투시키고, 안정제인 계면 활성제로 유화연료를 보존시켜 사용한다.

## 2.2 물 혼합 연료의 연소특성

물 혼합 연료의 연소 특성을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 미세 폭발에 의한 분무 유적의 미세화
- ② 미연소 탄화물의 완전연소(수성가스화 반응)
- ③ 과잉공기 감소에 따른 배기 손실 저감
- ④ 분무의 운동량 증가에 따른 공기 swirl 효과증대
- ⑤ 연소 온도 저하에 의한 열 해리 경향 억제

등의 효과를 볼 수 있는데 크게 미세 폭발에 의한 연료의 완전 연소로 인하여 PM을 줄이고, 효율을 향상하며, 물 입자에 의한 냉각 손실 저감 및 NOx의 감소로 요약할 수 있다.

### ① 미세 폭발에 의한 분무 유적의 미세화

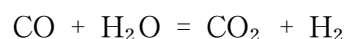
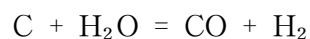
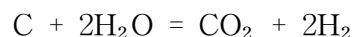
유중 수적형의 물 혼합 연료는 미세한 물 입자 주위를 연료 피막으로 쥔 구조로 되어있다. 이 액적이 연소실 내의 고온 가스로 인해서 가열되고 고온 가스와 연료 피막, 연료 피막과 내부 물 입자 사이에 급속한 열 이동이 일어나 그 속도가 충분히 큰 경우에는 물 입자는 연료 액적의 내부에서 합체하여 비점 이상으로 되어 과열 상태로 된다. 이와 같이 형성된 과열 수증기는 매우 불안정하기 때문에 물과 연료 액적은 큰 폭발력을 가지게 되어 미세한 액적으로 분리되어 연소실 내의 공기와 잘 혼합된다. 이 효과에 의해 연소가 촉진된다.

Fig. 2.1은 유화 연료 액적을 가열면상에서 증발시킨 경우의 구상 증발 영역에서 증발 형태의 상위를 도식적으로 종합한 것이다. (A)는 물이 증기로 먼저 변하기 때문에 미세 폭발이 발생하지 않는 경우이다. 이 형태는 액적 내에서

물 입자의 합체가 진행되지 않는 상태에서 각각 기화하므로 액적을 파괴하지 않고 단지 표면에서 수증기가 빠져나가는 현상이다. 이것은 기본 연료의 동점도가 높고 물의 혼합비율이 낮은 경우에 일어나는 팽창 형태이고, 미세한 유화연료에서 일어나기 쉽다. (C)는 미세 폭발이 발생하는 경우의 모양이고, 기본 연료의 동점도가 낮고 물의 혼합 비율이 높고, 물 입자의 직경이 큰 경우에 생기며 액적의 가열에 의해서 내부의 물이 혼합 상태에서 분리하여 합체가 진행된다. 이 합체 속도가 충분히 빠르기 때문에 기화가 느려 과열 상태에 달하고, 그 결과 과열음을 동반하는 폭발로 증발을 완료한다. (B)는 중간적인 형태로, 약한 미세 폭발(과열, 분열)이 발생하는 경우이다. 이것은 전열면 온도가 낮고, 기본 연료의 동점도가 높은 경우에 나타난다. 물 혼합 연료 액적을 가열면상에 증발시킨 경우에 일어나는 미세 폭발은 기본 연료의 동점도, 물의 혼합비율, 물의 입자 직경과 그 분포에 의해 크게 영향을 받으나, 어떤 경우에도 미세 폭발은 열면상의 액적이 구상으로 되고, 액적 내에 분산하고 있는 물 입자가 합체한 경우에 발생한다. 경유에서는 물의 혼합 비율이 0.1이상에서 미세 폭발을 일으키는데 반하여 A중유에서는 0.25, B 중유에서는 0.7정도가 혼합되지 않으면 미세 폭발이 발생하지 않는다.

## ② 미연소 탄화물의 완전연소(수성가스화 반응)

연료 입자가 연소과정에서 탄소미립자와 물(H<sub>2</sub>O)과의 접촉으로 수성가스화 반응을 일으켜 미연소물의 완전연소를 이루어 미연소 카본의 발생을 줄여준다.



③ 과잉공기 감소에 따른 배기 손실 저감

연료가 완전 연소에 가깝게 되어 공급 과잉 공기를 줄일 수 있다. 즉, 수성 가스화 반응에 의해 연소가 원활하고, 탄소 입자들이 감소해 완전 연소에 가깝게 연소하므로 과잉의 산소는 불필요하여 공급 공기를 이론치에 가깝게 감소시킬 수 있다.

④ 분무의 운동량 증가에 따른 공기 swirl 효과증대

물 혼합 연료에 포함된 물 액적은 질량을 증가시켜 큰 운동량을 보유할 수 있다. 이는 분무 액적의 회전 운동을 크게 하여 연소시까지 오랫동안 유지시킨다. 분무와 연소의 균일화를 이루어 불균형 연소로 국부적 고온을 감소시켜 NOx를 예방하고 PM를 줄일 수 있다.

⑤ 연소 온도 저하에 의한 열 해리 경향 억제

국부적 단열화염 온도가 높게되면 이중의 연소생성물이 단종의 생성물로 분리가 되는 열 해리 현상이 발생하여 불완전 연소 및 열 손실이 발생하게된다. 첨가된 물로 인해 국부적 온도 상승을 저하시켜 열 해리를 억제시킨다.

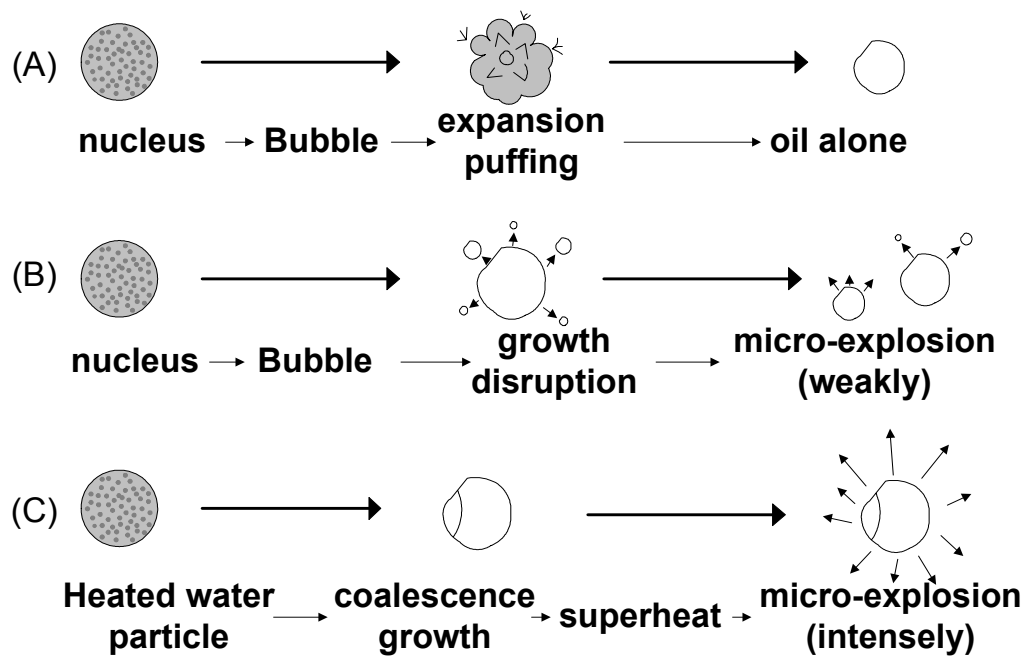


Fig. 2.1 Vaporizing behaviors of droplet

## Ⅲ. 실험장치의 구성 및 실험 방법

본 연구의 실험장치는 크게 두 가지로 물 혼합 연료의 상태 특성을 실험하는 실험용 버너와 효율, 배기가스 측정을 위한 상용 버너이다.

### 3.1 실험 버너의 구성 및 실험조건

#### 3.1.1 실험 장치

전체적인 실험 버너 장치의 개략도는 Fig. 3.1과 같으며 설치사진은 Fig. 3.2와 같다. 본 실험 장치는 물과 연료를 공급하기 위한 고압 펌프, 물 혼합형 분사기, Gun 타입 버너 그리고, 연소실로 구성된다. 물과 연료가 펌프에 의해 가압되고, 혼합기에서 물 혼합 연료가 생성된다. 이때 물 혼합량은 물 펌프의 압력으로 조절된다. 혼합기에서 생성된 물 혼합 연료는 버너 내부에 부착한 나선형 관으로 회전을 주어 물 액적이 재결합하는 것을 최대한 억제한 후 분사하여 연소가 이루어진다.

연소실에 5개 홀을 두어 연소 화염 구간에서의 NO<sub>x</sub>와 PM를 측정하였고, 온도는 각 홀의 화염 축으로부터의 거리(0, 15, 30, 50, 60, 100mm)에서 k-type 열전대로 측정하였다. 냉각수를 주입하여 연소실 온도를 일정하게 유지하였으며, 이때 입구와 출구의 온도를 계측하였다. 연소 화염의 가시화는 버너를 개방된 공간에서 연소시키고, 3m 거리에서 고속 카메라와 줌 렌즈를 이용하여 영상을 1ms 간격으로 촬영하였다.

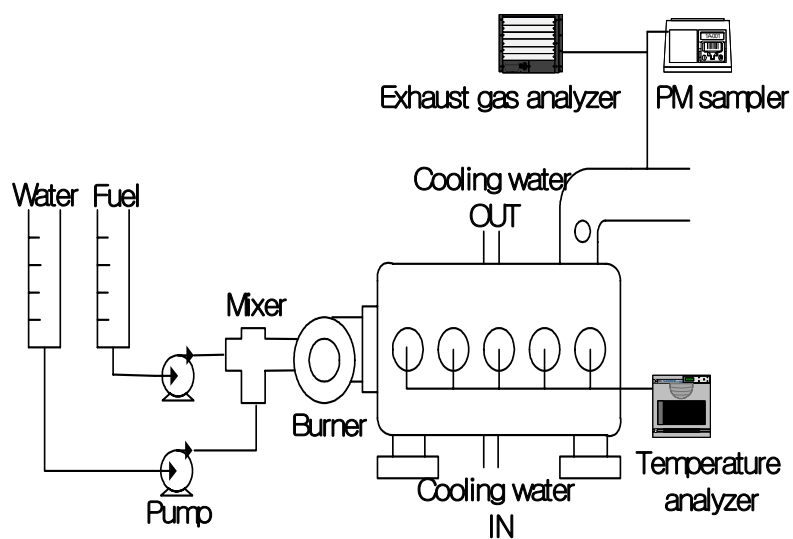


Fig. 3.1 Experimental burner setup



Fig. 3.2 Photo of test burner

Table 3.1 Specifications of burner and mixer

실험 버너 모델명	Gun type OM-2
연료 분사 노즐	3.5gal/hour
물 분사 노즐	0.75gal/hour
연료 펌프 압력	10bar
물 펌프 압력	10bar

### 3.1.1.1 와류 충돌형 혼합장치

Fig. 3.3은 와류 충돌형 물 혼합장치를 보여준다. 물 혼합 분사 시스템은 연료 펌프에 의해 가압된 연료가 혼합장치로 보내지고, 물 펌프에 의해 고압으로 가압된 물이 물 분사 노즐로 공급된다. 이때, 하부에 물 분사 노즐을 통해 고압으로 분사된 물은 작은 액적으로 깨어져서 연료 속에 침투하게된다. 물 분사 노즐을 편심을 주어 연료와 물이 충돌 후 회전 운동을 가지게 하여 물과 연료의 재결합을 방지한다. 버너로 들어가기 전 나선모양의 관을 두어 와류동을 발생시켜 잘게 분해된 물 액적이 다시 뭉쳐지는 것을 방지한다. 그리고, 물이 연료관으로 역류하는 것을 방지하기 위해 내부에 check valve를 설치하였다.



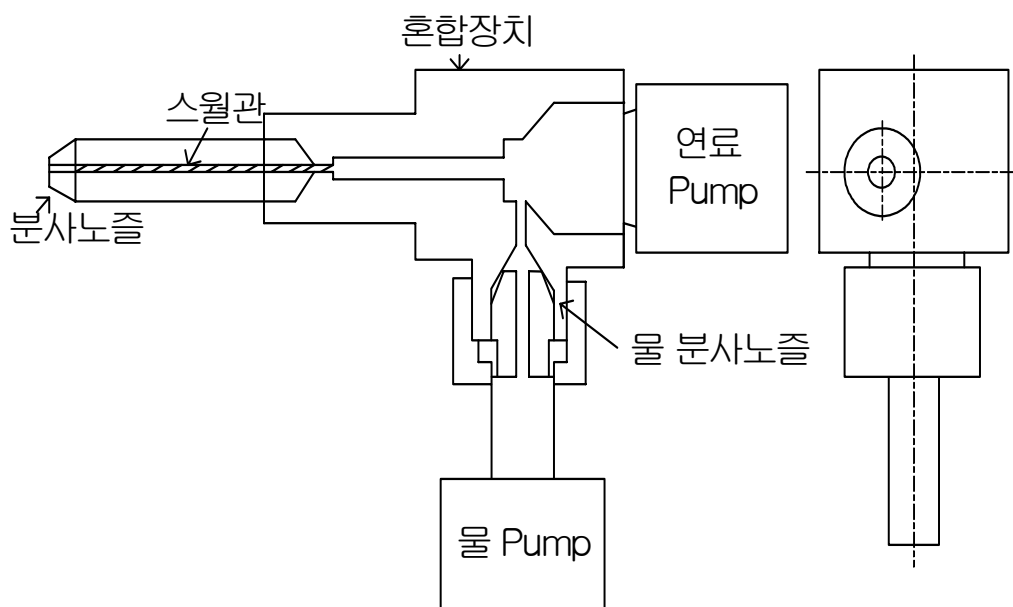


Fig. 3.3 Drawing of swirl impinging mixer

### 3.1.2 실험 조건

실험은 경유, 등유 각각에 대해 Case1, Case2, Case3 등의 3가지 경우에 대해 실시하고, 실험조건은 Table 3.2와 같다. Case1은 연료만 사용하는 일반 운전 구간에 연료량을 2.89ml/s로 공급하며, Case2는 Case1 상태에 물 펌프로 물을 0.53ml/s 공급한다. 이때 공급된 물로 인해 연료의 공급량은 감소하지만, 버너에 공급되는 유량은 같다. Case3은 연료 펌프의 압력을 조절하여 연료량은 Case1과 같은 2.89ml/s로 조절하여, 버너에 주입되는 연료의 양을 유지하며, 이로 인한 물 혼합량은 총량 대비 14%로 감소한다.

Table 3.2 Conditions of experimental burner

Division	Diesel (Gas oil)			Kerosene		
	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3
Fuel(ml/s)	2.892	2.415	2.87	2.85	2.08	2.85
Water(ml/s)	0	0.526	0.468	0	0.571	0.476
Mixing rate(%)	0	17.9	14	0	21.5	14.3

## 3.2 상용 버너의 구성 및 실험조건

### 3.2.1 실험장치

상용버너의 실험장치의 개략도는 Fig. 3.4와 같으며 설치사진은 Fig. 3.5와 같다. 본 실험 장치는 정확한 열효율을 측정하기 위해 석유 연소기기 시험방법 통칙(KS B8021-1991)에 의거 구성되었다. 연료와 물이 혼합기에서 물 혼합 연료가 생성된 후 바로 burner로 공급되어 연소되어진다. 배기구에서 배기가스 측정기와 PM sampler를 이용하여 질소산화물, PM등을 측정한다. 열효율 측정을 위해 냉각수를 공급한다. 공급된 냉각수가 버너의 열 교환기에서 급속한 열 교환이 어렵기 때문에 외부에 순환모터와 순환관을 두어 열을 재생 사용하고, 배출되는 냉각수의 양과 온도를 측정하여 열효율을 측정한다.

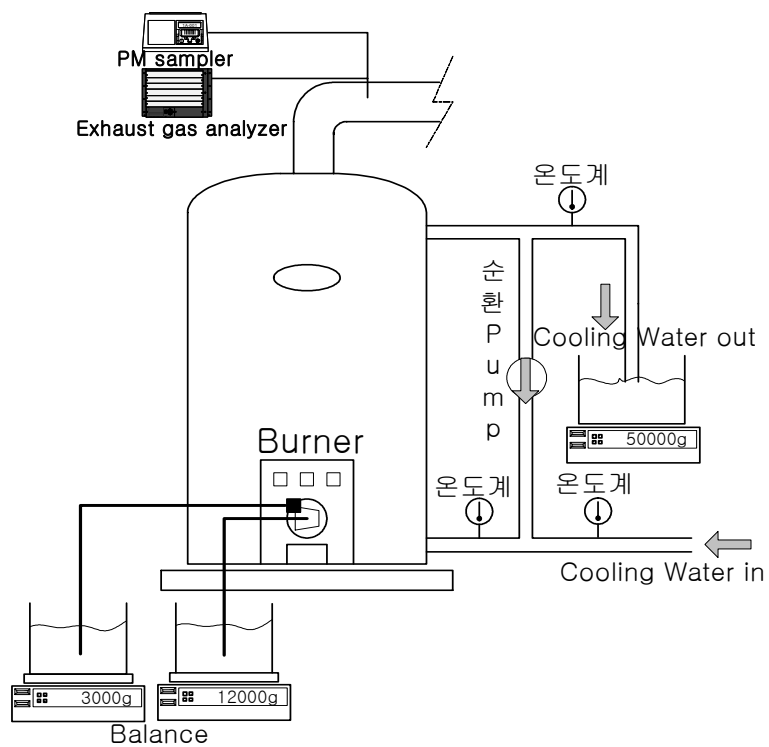


Fig. 3.4 Test burner for efficiency evaluation



Fig. 3.5 Photo of test burner for efficiency evaluation

### 3.2.2 실험조건

실험은 경유, 등유 각각에 대해 Case1, Case2 2가지 경우에 대해 실시하고, 실험조건은 Table 3.3과 같다. 경유, 등유에 대해 물 혼합 여부, 공기량의 변화를 주며 실험하였다. 물 혼합비는 12%, damper는 2.5, 3, 4로 변화시킨다. 열효율은 들어간 냉각수, 배출되는 냉각수의 양과 온도에 의해 결정되어진다.

Table 3.3 Conditions of commercial burner

Division	Diesel(Gas oil)		Kerosene	
	Case1	Case2	Case1	Case2
Fuel(kg/h)	10.45	9.35	11.05	9.86
Water(kg/h)	0	1.27	0	1.35
Mixing rate(%)	0	12	0	12.1

## IV. 실험결과 및 고찰

### 4.1 실험 버너의 연소 특성

#### 4.1.1 물 혼합 특성

Fig. 4.1은 버너 분사 노즐 출구에서 획득한 물 혼합 연료의 액적 현미경 사진이다. 연료·물 혼합기의 물 노즐에서 분사된 물 액적이 최종 버너 노즐까지 통과된 후에도 약  $10\mu\text{m}$ 로 유지되어 분사된 것을 볼 수 있다. 이는 혼합기에서 최종 분사 노즐까지 나선형으로 진행되어 물 액적들이 쉽게 뭉치는 것을 방지한 결과로 보여진다. 하지만 가운데 큰 액적이 생성된 것은 분사 후 촬영까지의 시간 사이에 작은 액적들이 빠르게 뭉쳐져서 생성된 것이다.

각종 논문에서 언급되었듯이 물 액적의 크기가  $1\mu\text{m}$  이하에서는 미세 폭발이 아닌 액적의 분리만 가져오고  $10\mu\text{m}$  이상에서는 미세 폭발은 잘 일어나지만 연소 효율이 저하되는 결과를 가져오므로 본 실험 장치의 액적 크기는 만족할만하다.

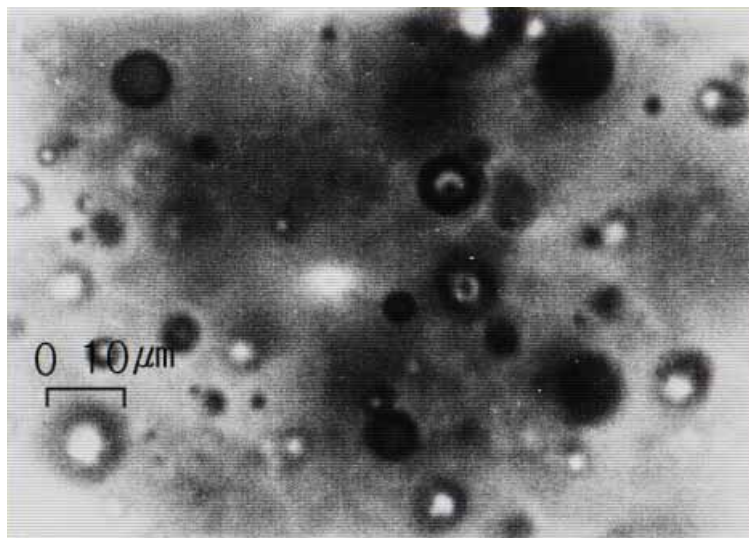
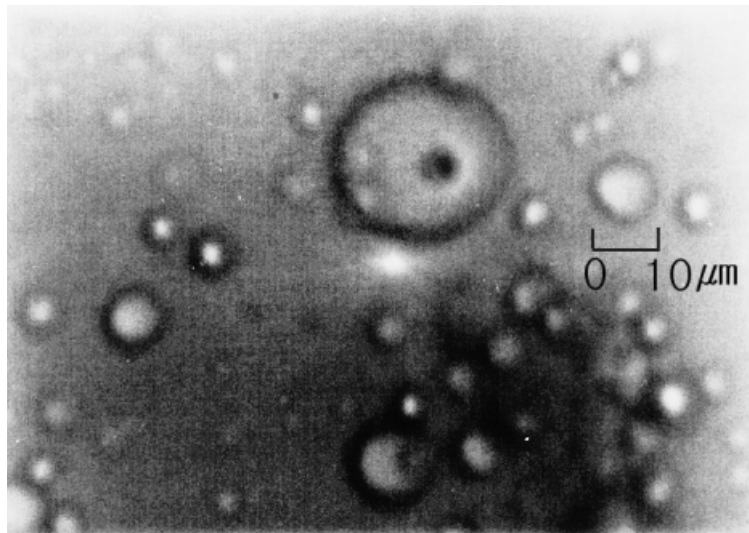


Fig. 4.1 Photographs of emulsified fuel

### 4.1.2 분무 특성

Fig. 4.2는 연료, 물, 물 혼합 연료를 분사하였을 때의 분무 형태를 보여준다. 모든 경우에 swirl 유동을 동반한 공기 유입에 의해 분무 축을 중심으로 선회하는 것을 알 수 있다. 연료만을 분사할 경우에는 분무 중심부위에 산란광이 집중됨을 알 수 있으며, 물을 혼합한 경우에는 좀더 넓은 분무 각과 함께 중심부의 액적 집중이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 swirl형 물 혼합장치에 의한 분무 swirl 유동의 영향으로 보여지며, 결과적으로 넓은 연소영역과 국부적인 화염온도 상승을 방지할 것으로 예상된다.

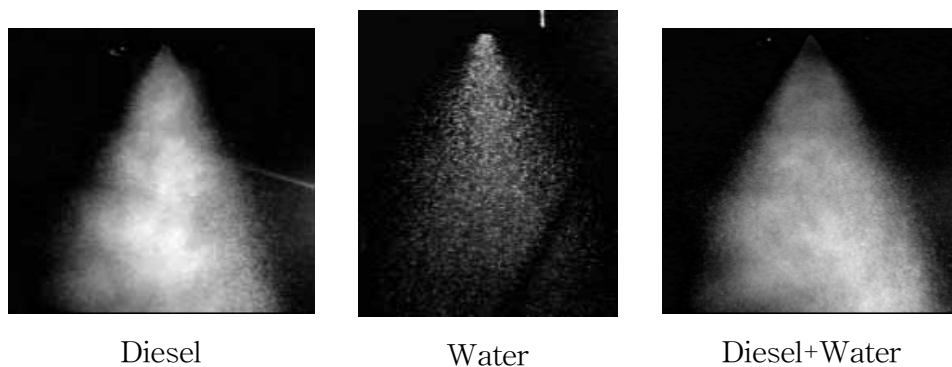


Fig. 4.2 Photographs of spray oil, water and emulsified fuel



### 4.1.3 온도 특성

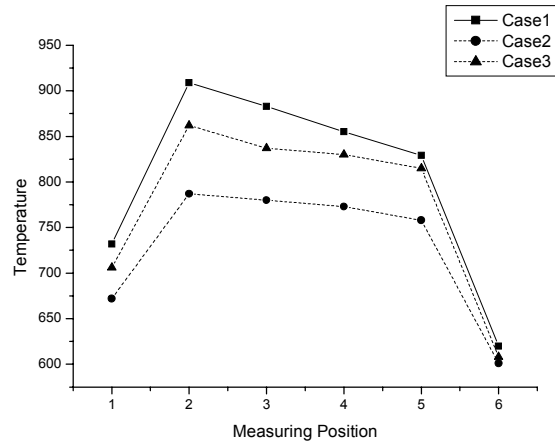
화염 중심축의 온도는 물 혼합을 하지 않은 Case1 보다 물을 14% 혼합한 Case3이 주 연소영역인 2~5번 홀에서 50℃ 정도 작게 나왔다. 하지만, 최종 배기구인 6번 홀에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 주연소 영역에 국부적 온도는 줄어들지만, 전체적인 온도 저하는 작은 걸로 보여진다. Case1의 경우 2번 홀에서 급속히 온도가 올라간 후에 빠르게 저하되지만, 물을 14% 혼합한 Case3은 급속히 온도가 상승하는 것을 막아주고 이후 하강을 느리게 하여 완만한 온도 그래프를 보여 주게된다.

중심에서 폭 방향으로 30mm 거리의 경우, 경우 Case1일 때 1번에서는 매우 낮다가 급격히 상승한다. 많은 양의 연료가 분사되었지만 분사기 쪽으로의 열 전달이 적어 2번 홀에서 주로 연소가 이루어져 NOx의 생산이 많아진다. 하지만, 경우 Case3의 경우 미세 폭발 등의 효과로 폭 방향 크기가 증가되어 1에서 2번 홀까지 큰 온도 상승을 보이지 않아 NOx의 저감이 기대된다. 등유의 경우는 역으로 물이 증발열을 흡수하여 연소가 1, 2구간에서 덜 이루어지는 것으로 보여진다.

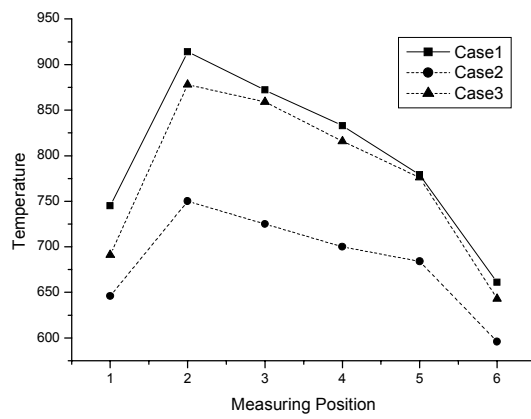
중심에서 폭 방향 50mm의 경우는 후기연소영역(3~5번 홀)에서 Case1과 Case3은 큰 차이를 보이지 않으며, 등유의 경우 감소 값이 크다. 대부분의 연소가 완료되면서 온도가 줄어든 것으로 보인다.

중심에서 폭 방향 100mm의 외각 영역에서도 Case1, Case3은 비슷하며 등유의 경우 연소 영역이 뚜렷이 나타나지 않는다.

물을 14% 혼합하면 초기에 급격히 온도가 올라가는 것을 막을 수 있다. 이처럼 올라가지 않은 온도는 후에 보상이 되어 평균값을 유지하며 감소되는 것을 볼 수 있어, NOx의 감소가 기대된다. 등유의 경우는 경유보다 물에 의한 온도 저하가 작고, 배기구에서의 온도가 높아 연소가 지속적이며, 냉각수에 의한 열 교환이 완전히 이루어지지 않아서 열 손실이 발생할 것으로 보여진다.

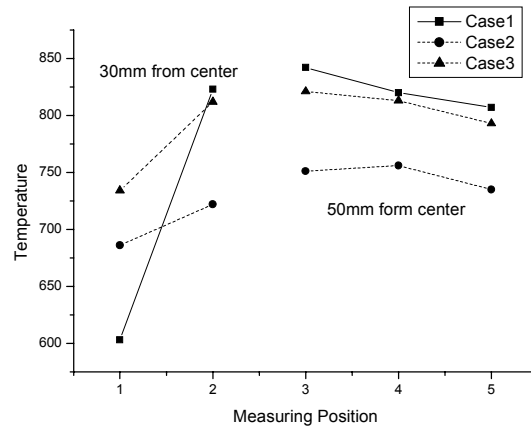


Diesel

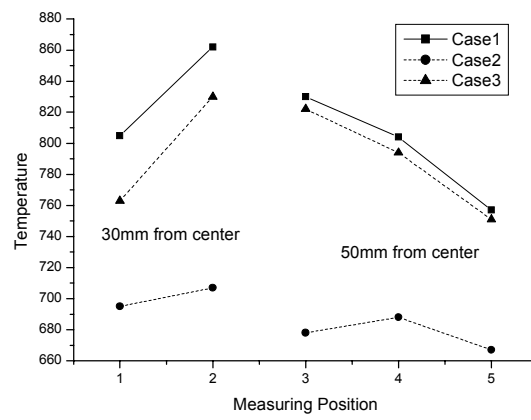


Kerosene

Fig. 4.3 Temperature variation at the center line

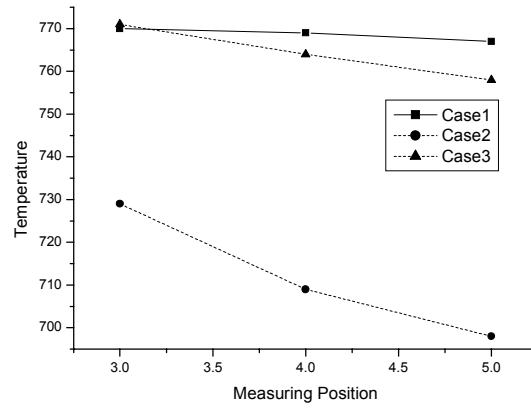


Diesel

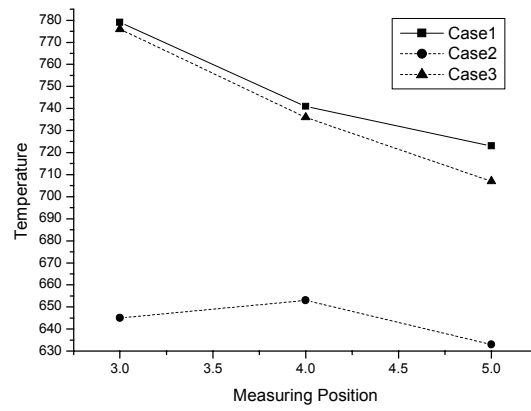


Kerosene

Fig. 4.4 Temperature variation at 30mm, 50mm from center



Diesel



Kerosene

Fig. 4.5 Temperature variation at 100mm from center

#### 4.1.4 화염 특성

디젤만 분사하는 Fig. 4.6의 경우 전체적인 화염 형상은 폭 방향으로 짧으며 길이 방향으로 상당히 길고, 화염 초기에서 말기까지 연속적이며 안정적인 연소를 보여준다. 화염 초기와 중기에 밝은 색의 고온 부분이 넓은 범위에 집중되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 NO<sub>x</sub>의 주요 발생 원인으로 보여진다. 그리고, 가끔 화염 길이가 변동하는 것은 연료 분사의 맥동으로 보여진다.

디젤에 물 14%를 포함하여 연소하는 Fig. 4.8의 경우 화염 길이가 짧아지는 것을 볼 수 있으며 폭 방향은 약간 증가하였다. 화염 길이의 감소는 대략 20~30% 정도로 보이며 폭 방향 증가는 화염 초기영역에서 크게 나타난다. 하지만, 온도그래프에서 보듯이 감소된 부분의 온도가 크게 떨어지지 않는 걸로 봐서 낮은 온도의 연소가 계속 이루어지는 걸로 보여진다. 전체적으로 경유만 연소시킨 Fig. 4.6 보다 연소 화염온도가 줄어든 것을 볼 수 있고 특히, 주연소 부분의 화염 중간, 중간에서 온도가 아주 낮은 영역들을 볼 수 있다. 화염 끝 부분에서 간헐적으로 연소가 생성되는 부분도 볼 수 있는고, 화염 길이 감소, 폭 증가, 전체적인 온도 감소등 모든 현상은 미세 폭발 효과로 설명되어질 수 있다. 폭 증가와 길이 감소는 미세 폭발로 넓게 퍼지며, 작게 깨어진 액적들이 빠르게 연소하여 진행속도의 저하를 가져온다. 하지만, 생성된 수증기로 인해 국부적인 온도의 감소로 인한 미연소 액적들은 주 연소 구간을 지났을 때 연소가 이루어진다. 이는 화염 외각에 잔 불꽃들이 다수 생성되었다 소멸되는 것으로 확인할 수 있다. 이처럼, 물 혼합연료의 사용은 국부적 온도상승을 줄이고 연소 초기에서 말기까지 온도변화를 완만하게 한다.

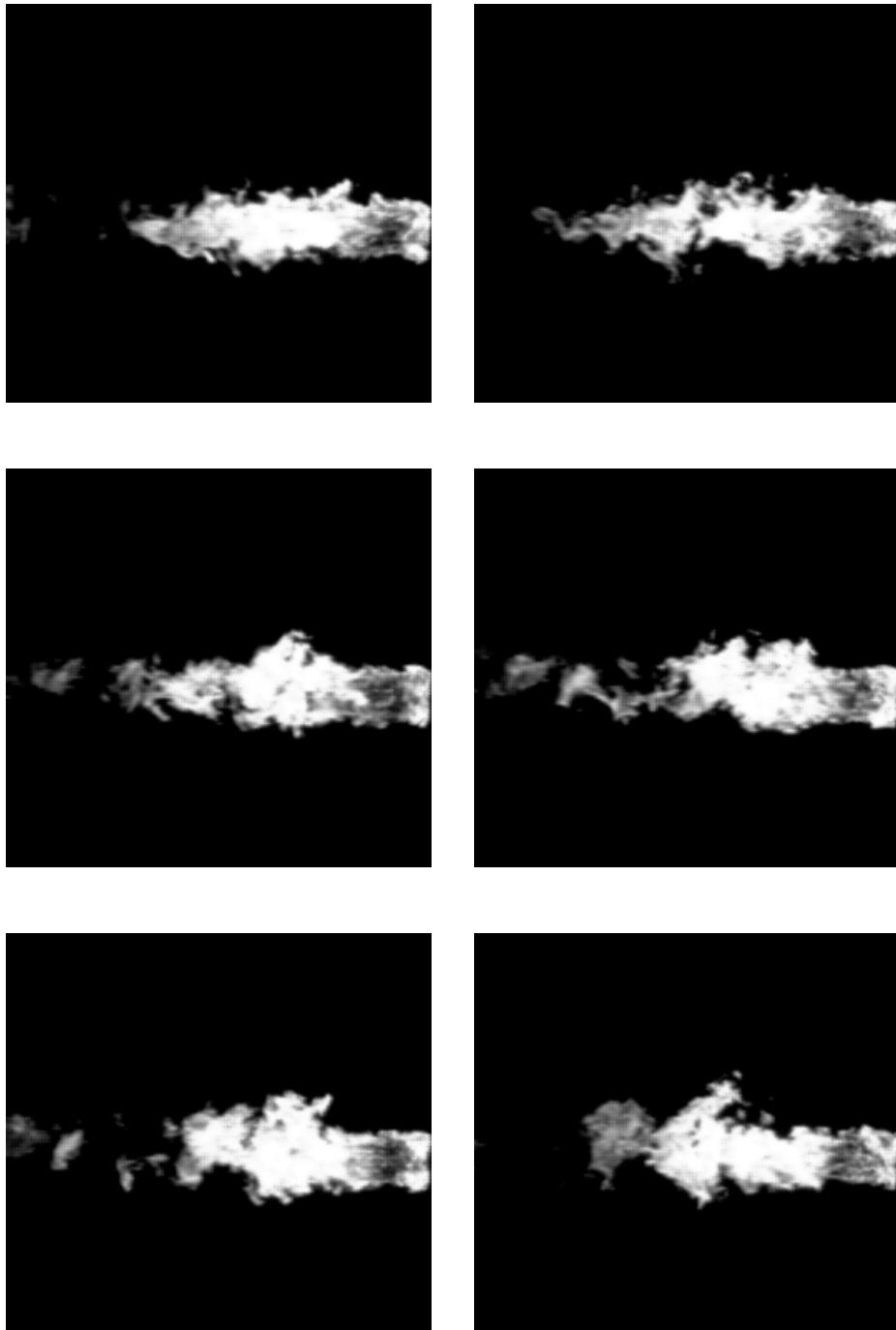


Fig. 4.6 Flames in burner using diesel fuel oil

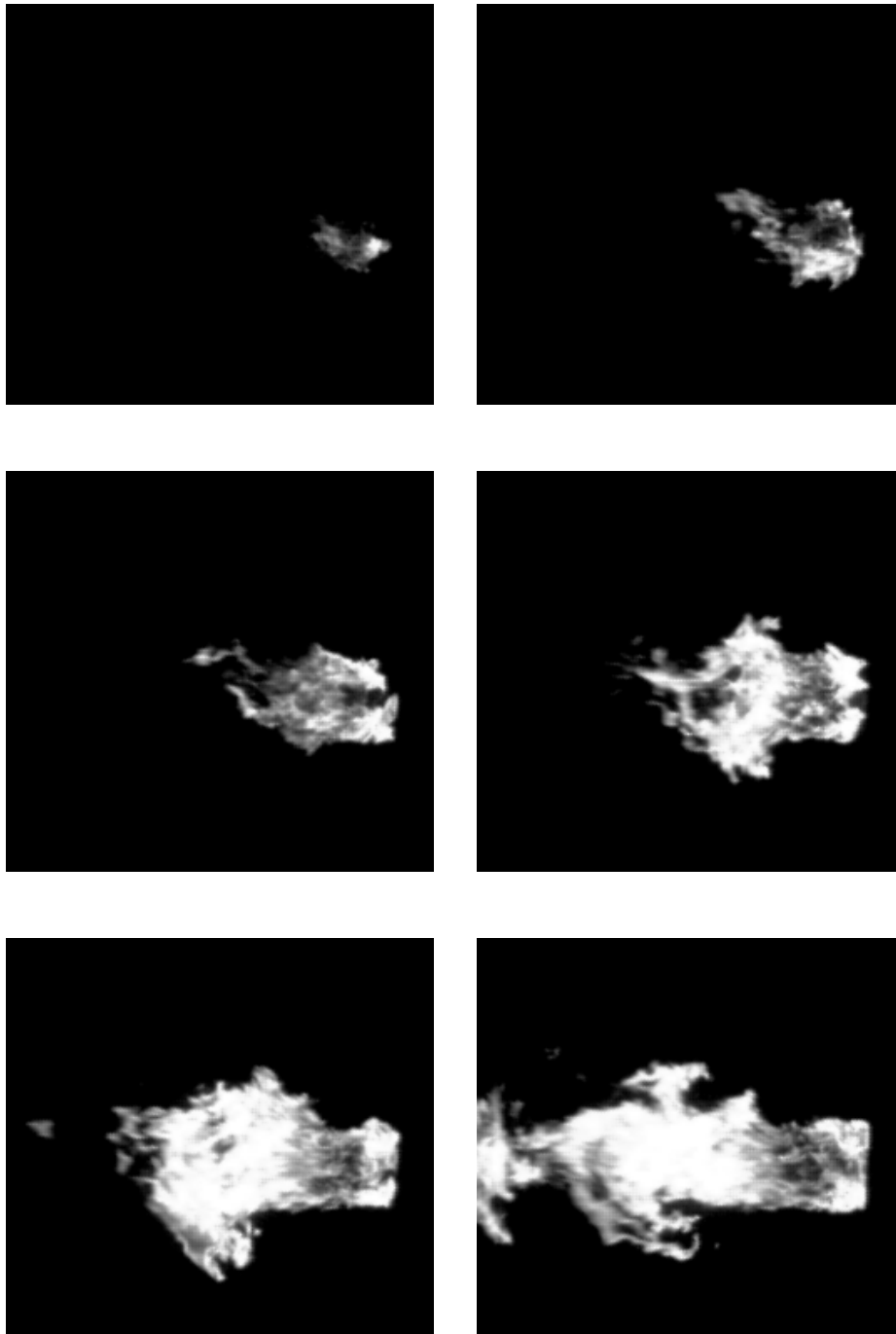


Fig. 4.7 Flame development of diesel fuel at ignition start



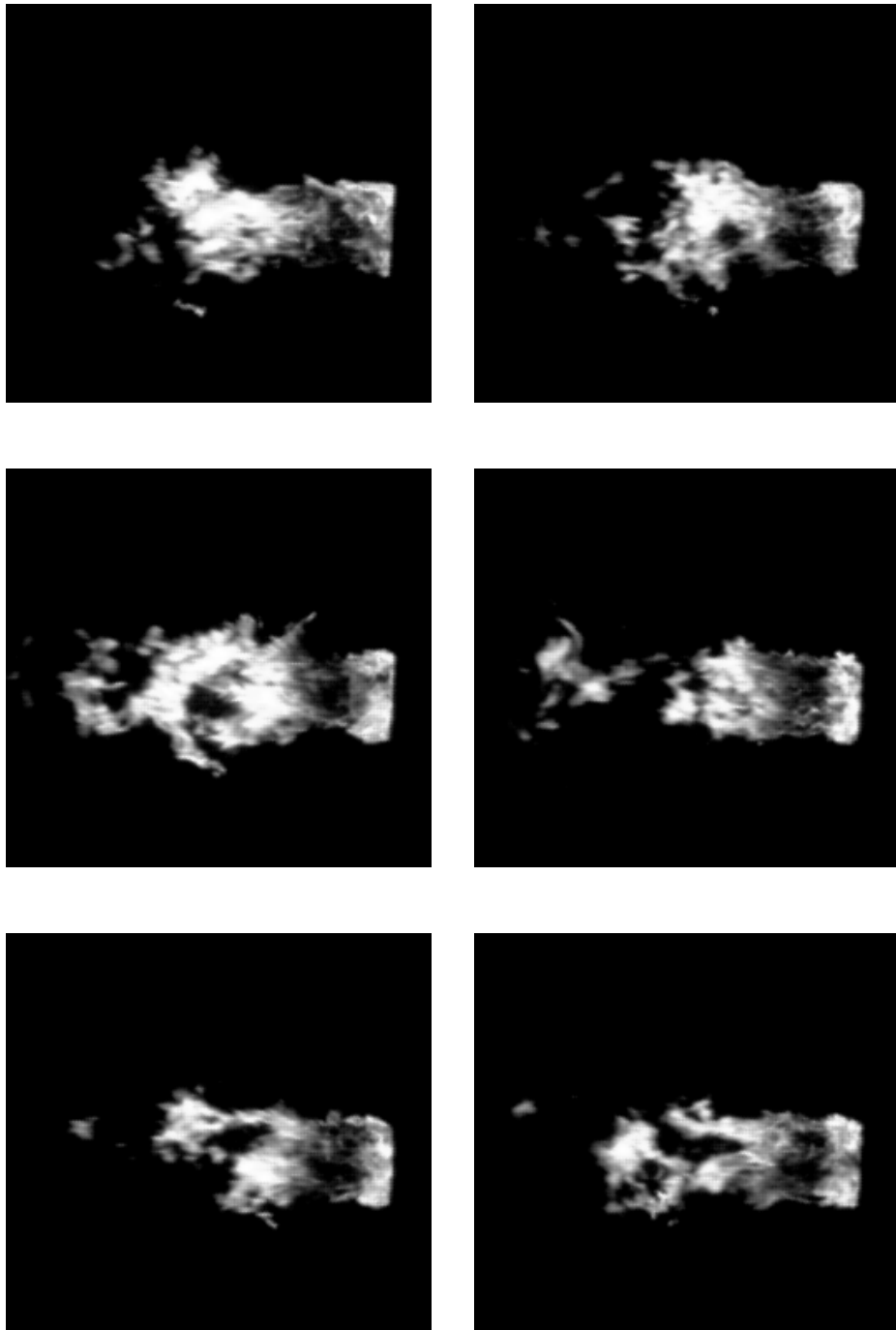


Fig 4.8 Flames in burner using 86% diesel and 14% water mixing fuel

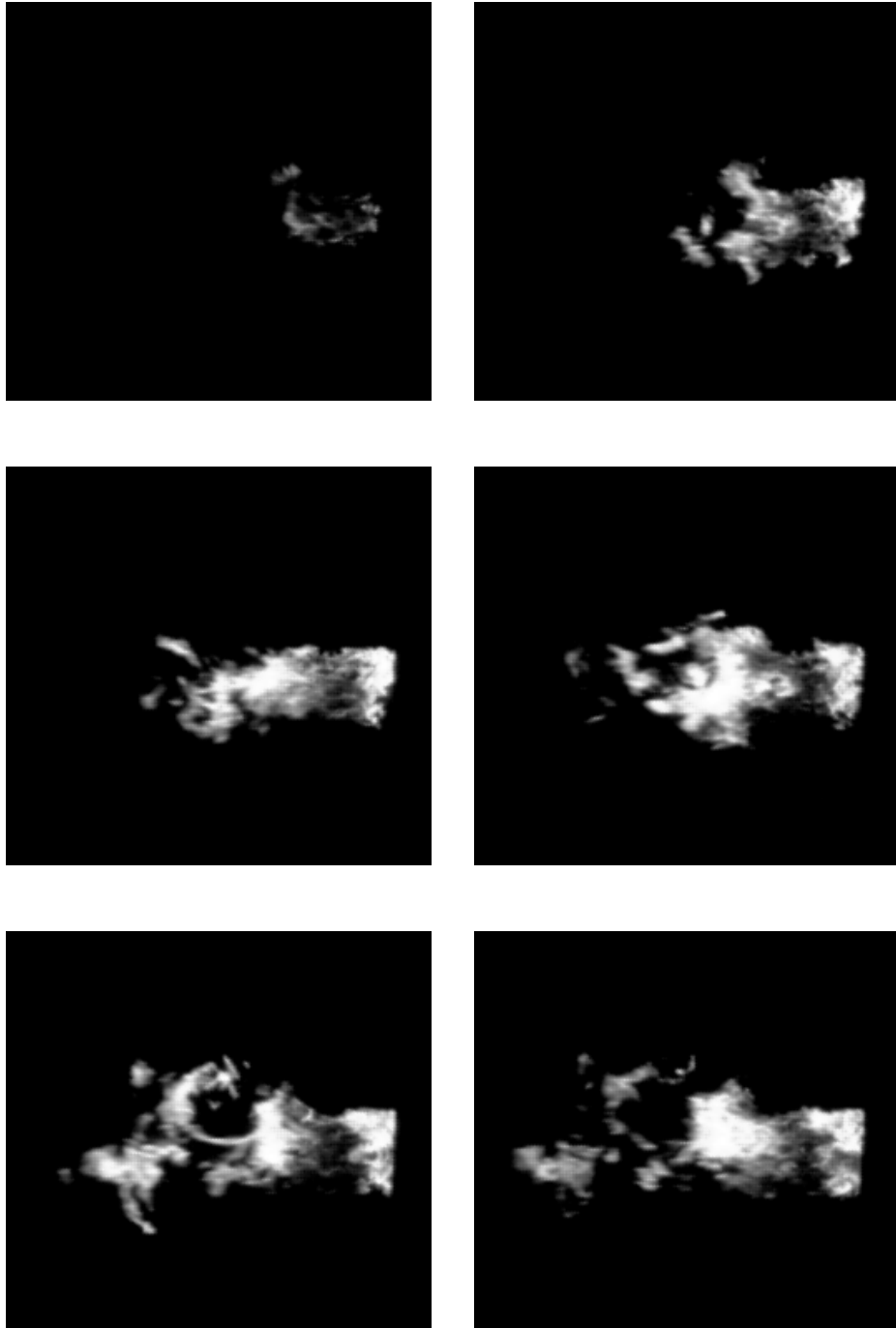


Fig 4.9 Flame development of 14% water mixing diesel fuel at ignition start

등유에 대해서는 물 주입의 영향이 경유에 비해 약간 적은 것으로 보여진다. 등유만 사용한 Fig. 4.10의 그림과 보듯이 경유의 Fig. 4.6을 비교하였을 때, 등유의 화염은 폭 방향으로 크고 넓은 부분에서 연소가 부드럽게 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그리고 화염 윗 부분과 끝자락에서 잔 불꽃들이 많이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 등유의 점도가 낮아 쉽게 증발, 연소하기 때문에 연소가 활성화 된 것으로 사료된다. 등유를 사용한 Fig. 4.10 역시 전체적으로 화염이 안정적이며, 중앙 부분에 집중적인 고온 영역을 볼 수 있다.

등유에 물을 사용한 Fig. 4.12의 경우는 화염 끝자락에 무수한 작은 화염들이 존재하며 폭 방향으로 아주 넓게 번지는 것을 볼 수 있다. 주 화염 속에 국부적인 온도 저하들이 많이 보이며, 국부적인 온도저하도 많이 보인다. 하지만, 경유의 물 혼합보다 온도 저하의 크기는 작으며 연소도 안정되어 있다. 이것은 등유 특성 중 점도와 관계된 것으로 보인다.

점화시의 연소화염을 비교하면 경유만으로 점화시킨 Fig. 4.7, 경유와 물을 동시에 사용하여 점화시킨 Fig. 4.9를 보면 경유만으로 점화시킨 Fig. 4.7의 경우는 처음 불꽃이 점화 후 빠르게 화염이 진행되어 정상상태로 이룬다. 하지만, 물을 동시에 사용한 Fig. 4.9의 경우는 점화 시작 후 Fig. 4.7 보다 약 3~4초 늦게 연소가 시작되고, 정상상태에 도달되는 시간도 길어진다. 연소 성장 과정에서도 연소영역 안에 비어 보이는 영역들이 보이고 그 주위에 화염들이 빈 공간을 타고 진행되는 것을 볼 수 있다. 이는 물의 영향으로 연소의 성장을 막고, swirl이 일어나는 방향으로 불꽃들이 번지는 결과이다.

등유만으로 점화시킨 Fig. 4.11과 물을 혼합한 Fig. 4.13의 경우에서도 마찬가지로 Fig. 4.11의 경우는 빠르게 연소가 성장하여 정상상태로 진행하지만, Fig. 4.13의 경우는 점화 후 연소 화염이 연속적이지 않고 중간에 끊어지는 부분을 볼 수 있고, 그 후에 다시 넓게 퍼지면서 산발적인 연소가 이루어지는 것을 볼 수 있다.

연료만으로 점화시킨 경우는 점화 후 빠르고 안정적으로 정상 상태에 도달하지만 물을 혼합한 경우는 점화 후 3~4초 후에 연소가 진행되고 정상상태로 가는데 시간도 많이 걸리며, 성장 과정도 약간 불안정하다. 즉, 연소 초기에 발화 온도까지 빨리 올려야 하나 물의 주입으로 온도 상승을 어렵게 하기 때문이다. 이상의 분석에서 볼 때, 버너에서의 물 혼합 연료 사용에서 점화 초기에는 연료만으로 점화를 시키고 연소실 온도가 일정수준 올라가고, 화염이 안정된 후에 물 혼합 연료를 주입하는 것이 필요하다.

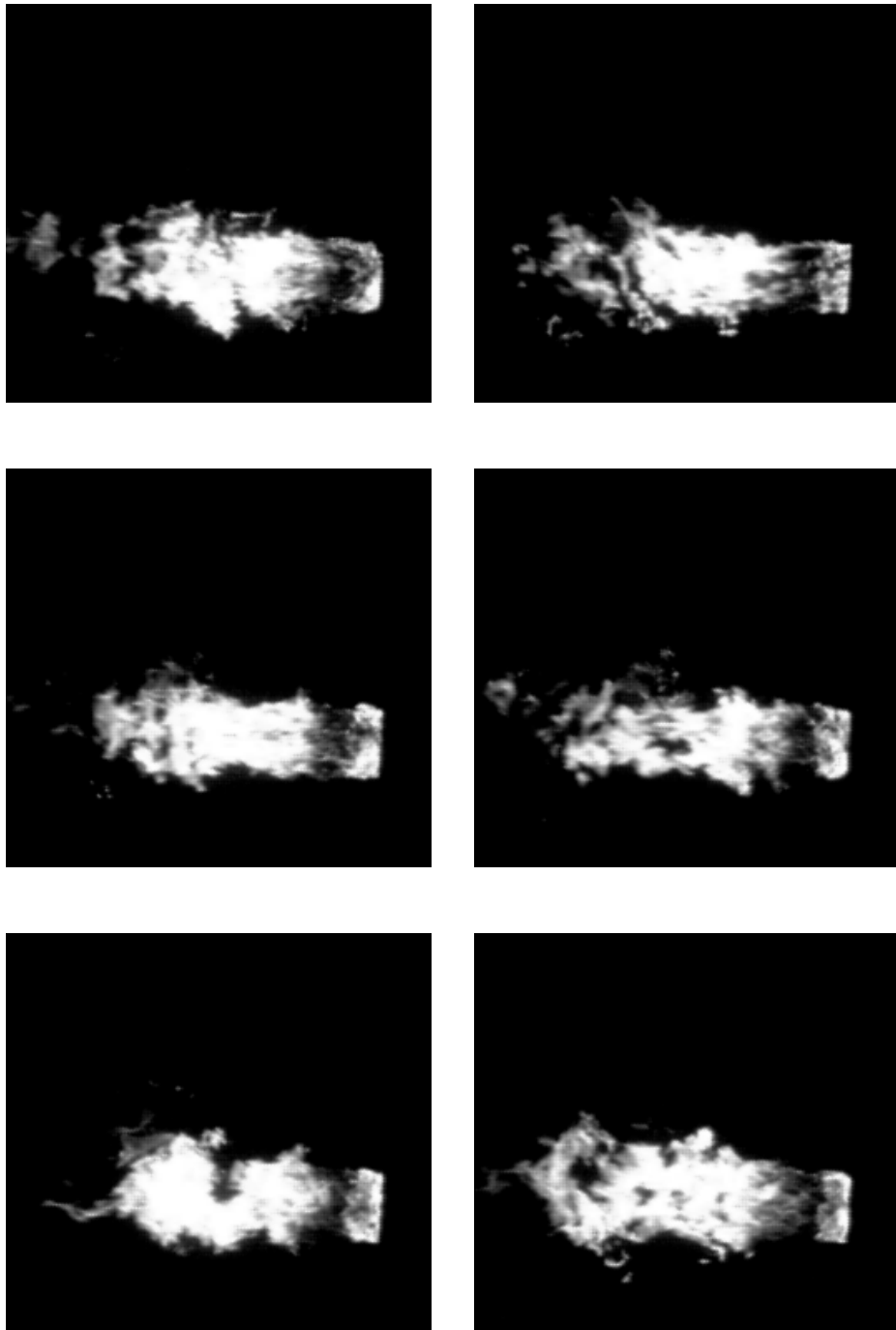


Fig 4.10 Flames in burner using kerosene fuel oil

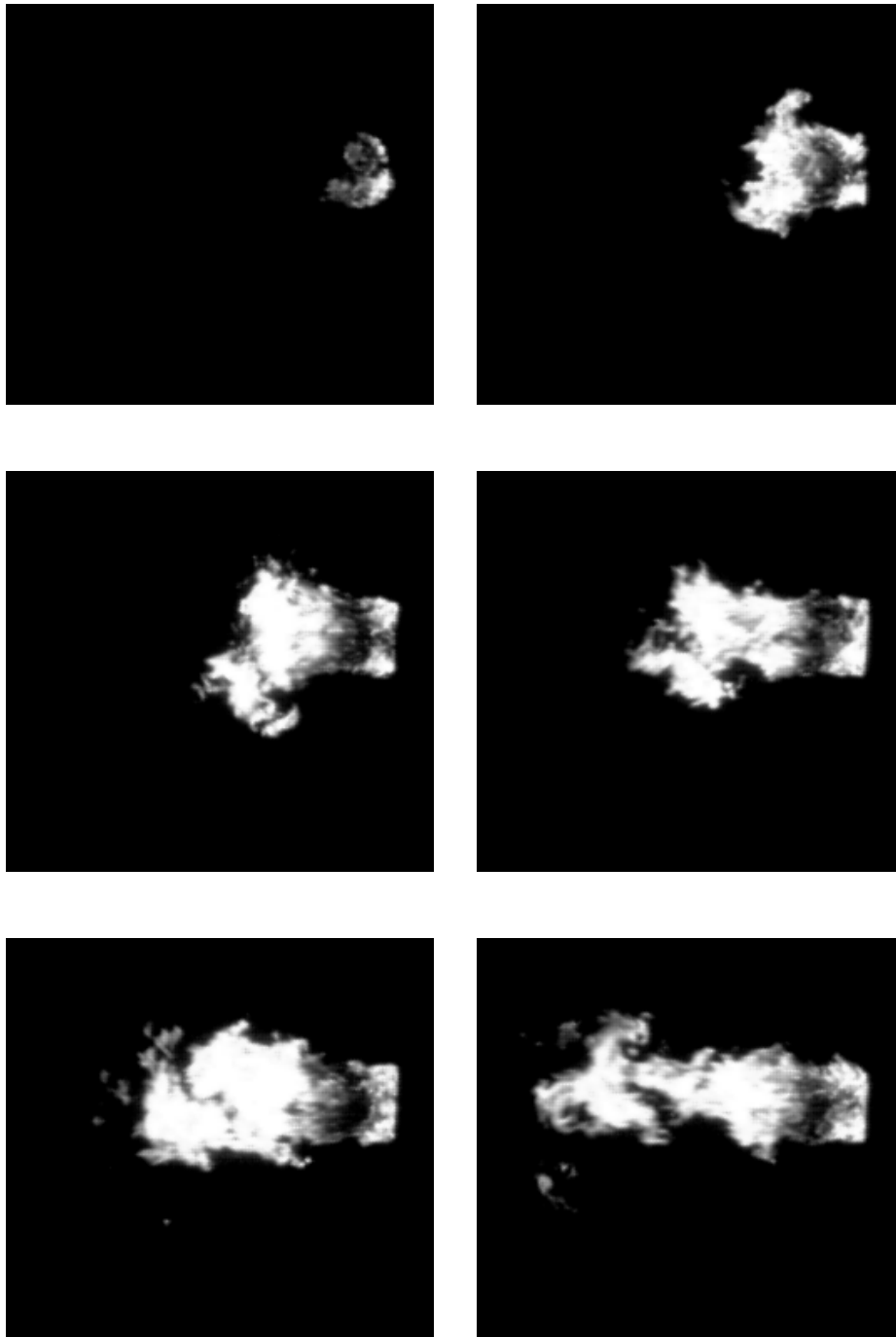


Fig 4.11 Flame development of kerosene fuel at ignition start

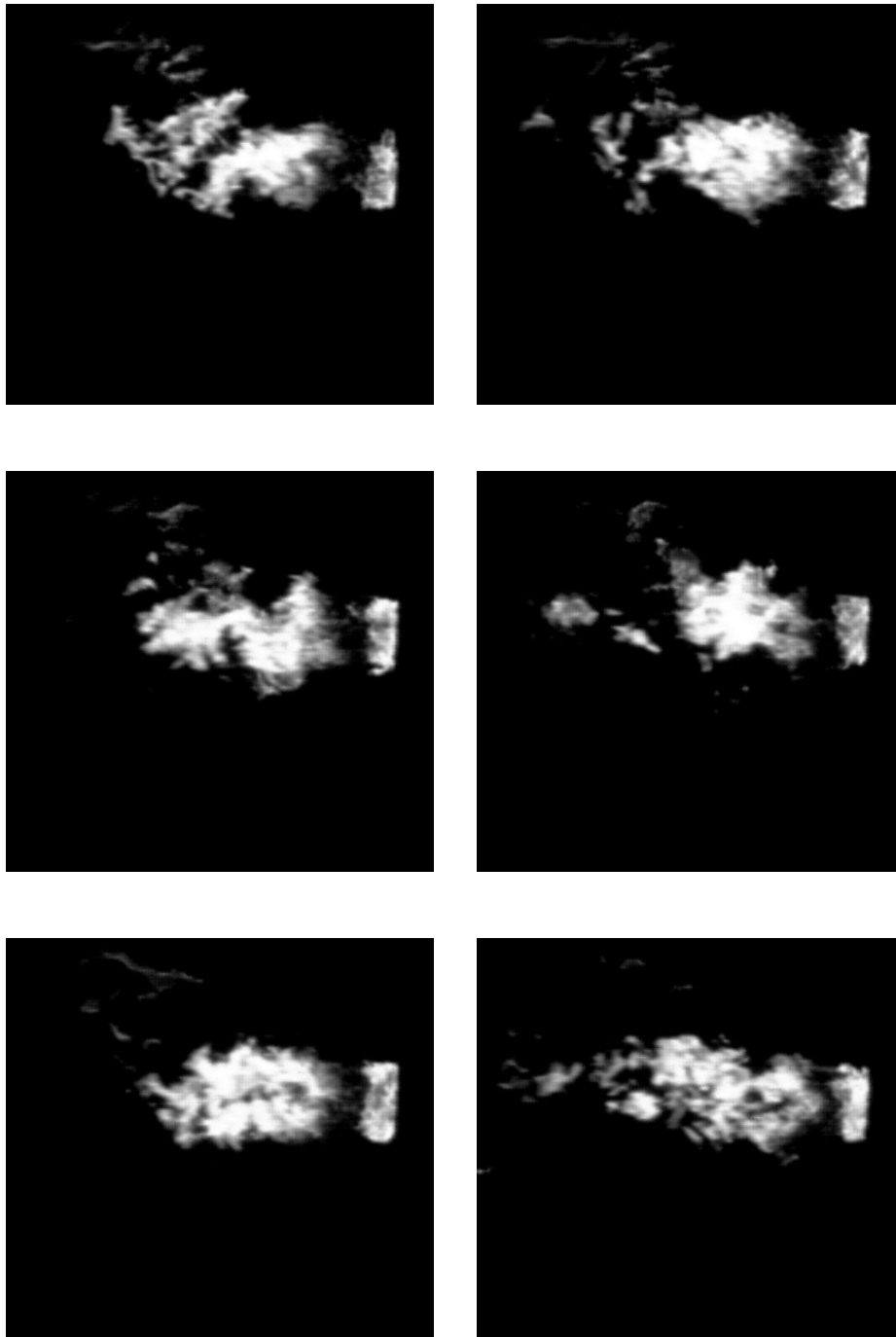


Fig 4.12 Flames in burner using 86% kerosene and 14% water mixing fuel

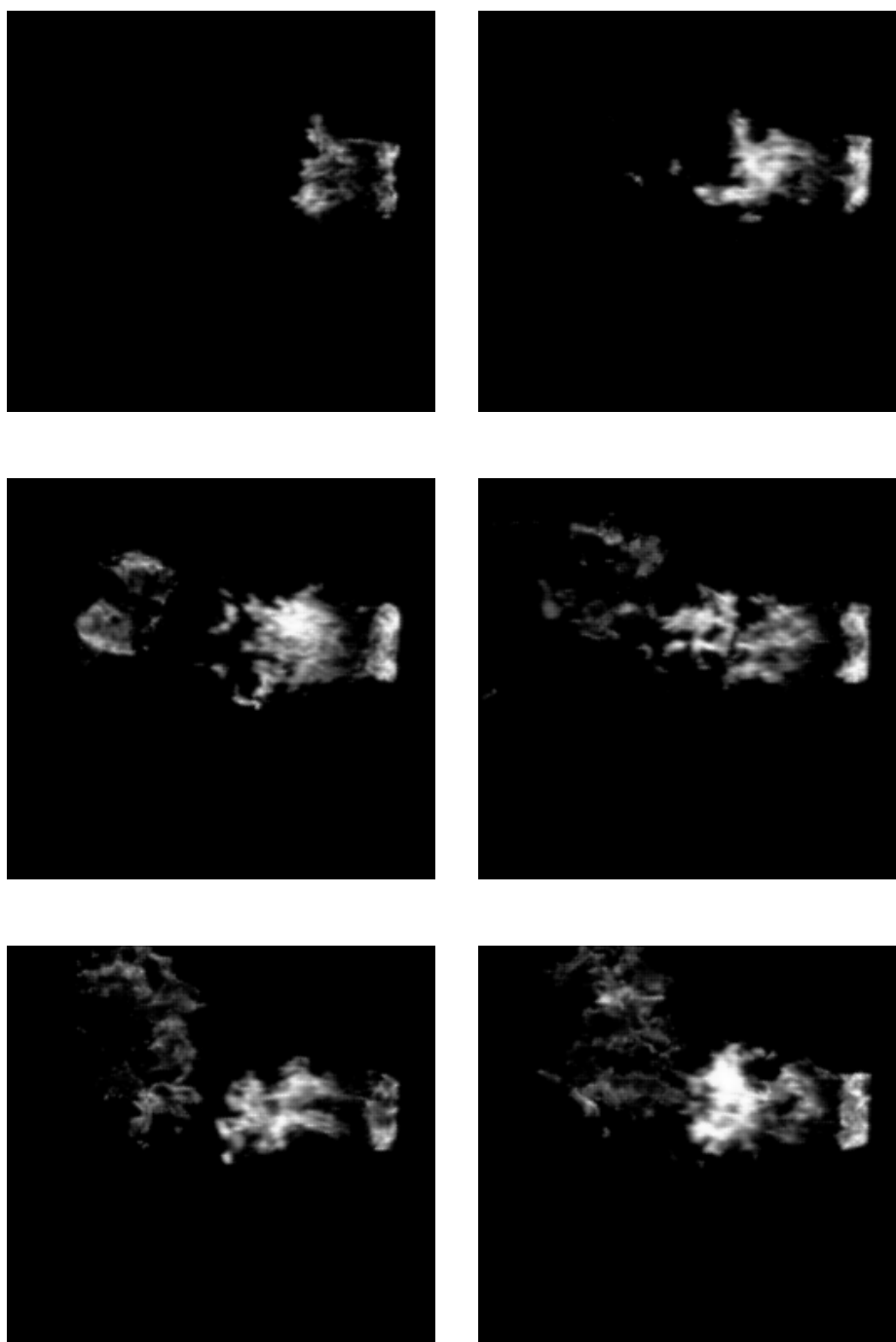


Fig 4.13 Flame development of 14% water mixing kerosene fuel at ignition start

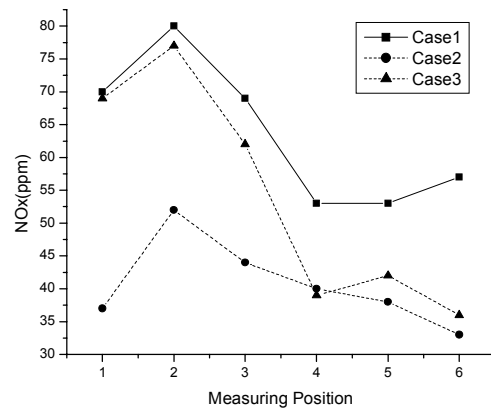


## 4.1.5 배기 특성

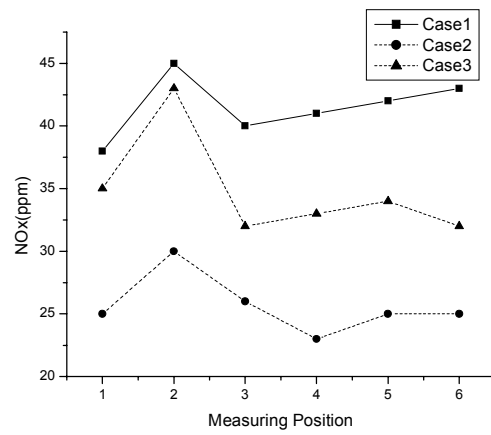
### 4.1.5.1 질소산화물

경유에서 물을 혼합하지 않은 Case1, 연료양이 줄어들고 물을 17.9% 혼합한 Case2, Case1과 연료량은 동일하면서 물을 14% 추가한 Case3의 NOx 양을 비교하면 물을 사용하지 않은 Case1보다 물을 사용한 Case2, Case3의 NOx 감소량은 37~42%에 달한다. 연료량이 동일한 Case1과 Case3을 비교하면 1, 2번 위치에서 NOx의 수치는 비슷하지만 물을 혼합한 Case3은 갈수록 NOx 수치가 감소하여 최종 배기구인 6번에 가서는 37%의 NOx 저감을 가져왔다. 이는 전반적인 연소 온도 저하로 NOx의 환원 분위기가 조성되어 연소가 진행되어질수록 NOx 수치가 감소된 결과로 보여진다.

등유의 경우는 경유보다 전반적으로 NOx의 수치가 낮게 나오고 초기에서 말기까지 NOx의 수치 변동이 적었다. 즉, 점도가 낮아 증발이 잘 이루어지고 넓은 부분에서 연소가 잘 이루어져 국부적 온도 상승이 없어 NOx의 수치가 경유 보다 덜 한 걸로 보여진다. 등유만 사용한 Case1과 14% 물 혼합을 사용한 Case3을 비교하면 25.6%의 NOx 저감 효과를 가져왔다.



Diesel

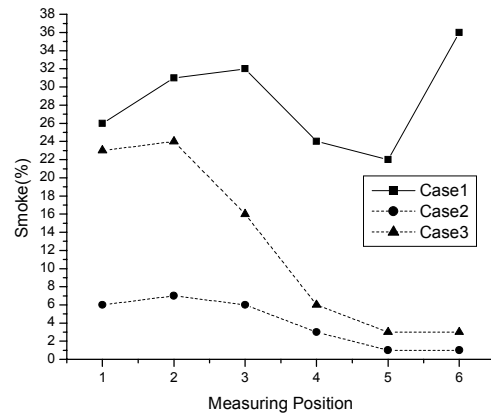


Kerosene

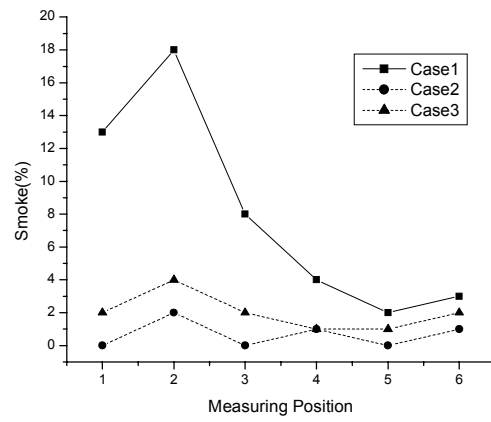
Fig. 4.14 Comparison of NOx

#### 4.1.5.2 입자상 물질

경유의 PM 감소량은 눈에 띄게 좋아졌다. 물을 혼합한 Case2, Case3은 PM 92%의 감소를 보여준다. 미세 폭발에 의한 완전연소의 결과 PM의 감소를 가져온 걸로 보여진다. 하지만 등유의 경우는 고급유로 뛰어난 연소 성능으로 PM의 발생이 적으므로 물 혼합 연료의 사용으로 큰 효과를 보지 못하였지만 1~2%의 PM 감소로 물 혼합 연료의 효과를 조금은 입증하였다.



Diesel



Kerosene

Fig. 4.15 Comparison of PM

## 4.2 상용버너의 연소 특성

### 4.2.1 열효율

Fig. 4.16은 상용버너에서 물 혼합 연료를 사용하였을 때의 열효율을 나타낸다. 실험은 석유 연소기기 시험방법 통칙(KS B8021-1991)에 의거 냉각수 유입 온도와 출구온도의 차, 냉각수 유량에 의해 열 효율을 계산하였다. 계산식은 식(1)과 같다.

열량  $H = \text{비열}(\text{kcal/kg}^\circ\text{C}) * \text{냉각수량}(\text{kg/h}) * \Delta T(^\circ\text{C})$

$$\text{효율 } \eta = \frac{\text{열량}H}{\text{저위발열량}(\text{kcal/kg}) * \text{연료량}(\text{kg/h})} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

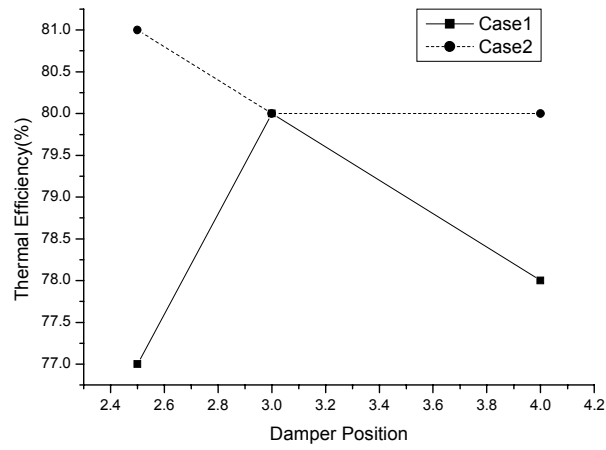
\*경유 LHV = 10,300kcal/kg

\*등유 LHV = 10,000kcal/kg

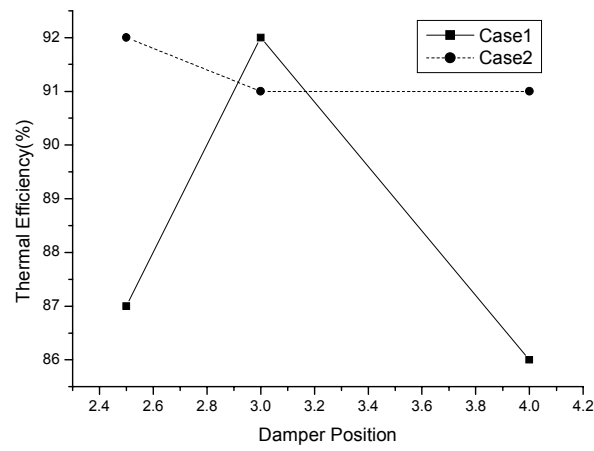
경유의 경우 물 혼합을 하지 않은 순수 연료만 사용한 Case 1일 때 최대 열효율이 80%고, 물 혼합 연료를 사용하였을 때는 81%로 1% 높게 나왔다. 경유 Case 1일 때는 최적의 열효율을 위해 공기 damper 위치를 3에 놓게되며 물 혼합 연료는 공기량을 줄일 수 있어 열효율이 상승한 걸로 보여진다.

등유는 물 혼합 연료를 사용하지 않은 Case 1과 물 혼합 연료를 사용한 Case 2의 최대 효율이 92%로 동일하게 나왔다. Case1은 damper 3에서 Case 2는 damper 2.5위치의 비교치다.

전체적으로 물 혼합 연료를 사용에 따른 열 효율은 같거나 약간 올라가는 것을 볼 수 있는데, 연소공기의 공급 양에 따라 크게 좌우되는 것을 볼 수 있다. 연료만 사용한 Case1의 최적 연소 공기조건은 damper 3이며, 물 혼합 연료에서는 damper 2.5로 공기 양을 줄일 수 있다. 하지만 일반적인 버너 사용 조건은 열효율이 최대가 되는 지점이 아니라 PM가 최소로 나오는 지점을 사용하기 때문에 배기 특성과 비교하여 사용 효율이 결정된다.



Diesel



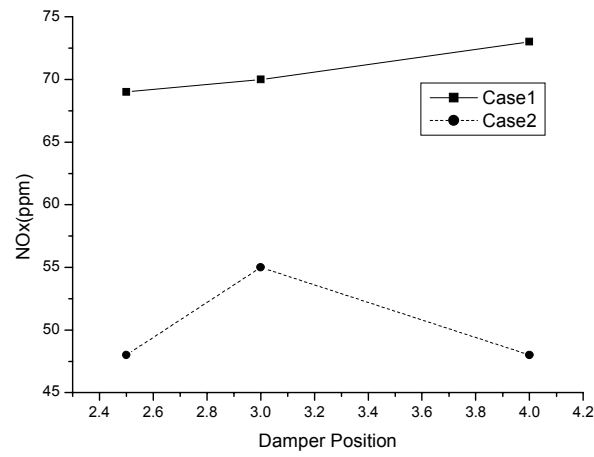
Kerosene

Fig. 4.16 Comparison of thermal efficiency

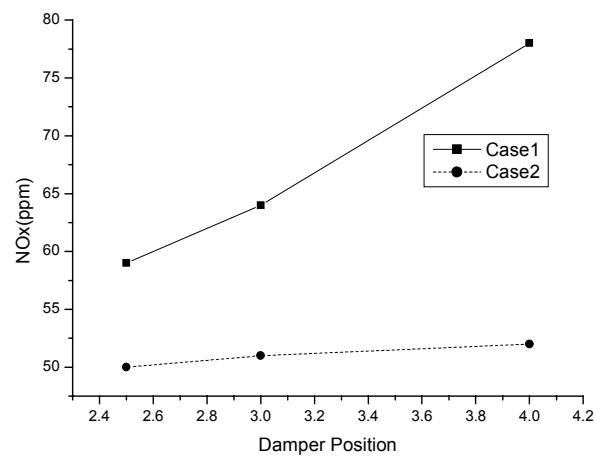
## 4.2.2 배기 특성

Fig. 4.17은 NO<sub>x</sub> 배출 결과로 물 혼합 연료를 사용한 Case 2가 전반적으로 NO<sub>x</sub>가 매우 적게 나오는 것을 볼 수 있다. 공기의 추가 투입됨에 따라 NO<sub>x</sub>의 배출은 이론 공연비 근처에서 증가하다가 과잉공기가 너무 많아지면 화염 온도의 저하로 NO<sub>x</sub>는 감소한다. 경유의 경우는 전반적으로 높은 크기의 NO<sub>x</sub> 배출을 나타낸다. 이는 점도의 특성으로 인해 분무 액적의 미립화가 덜 되었기 때문인 것으로 보인다. 하지만, 등유의 경우는 초기에 낮은 NO<sub>x</sub> 배출에서 공기가 추가 공급 될 때마다 급격한 NO<sub>x</sub> 배출을 나타내는데 이는 등유의 점도가 낮아 과잉공기가 공급 될 때 화염이 뒤로 밀려 연소의 불안정성 때문에 국부적 고온 부분이 생긴다. 열효율도 이 지점에서 급격히 떨어지는 결과이다. 전체적으로 물 혼합 연료를 사용하였을 때 NO<sub>x</sub>의 배출이 30%이상 떨어지는 것을 볼 수 있고, 과잉공기의 감소가 NO<sub>x</sub> 저감에 필수적이다.





Diesel

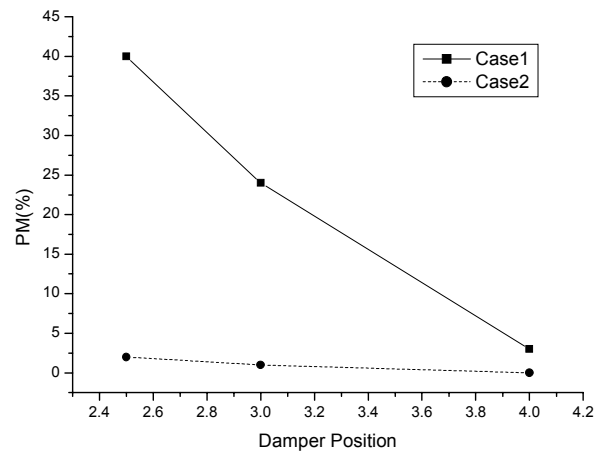


Kerosene

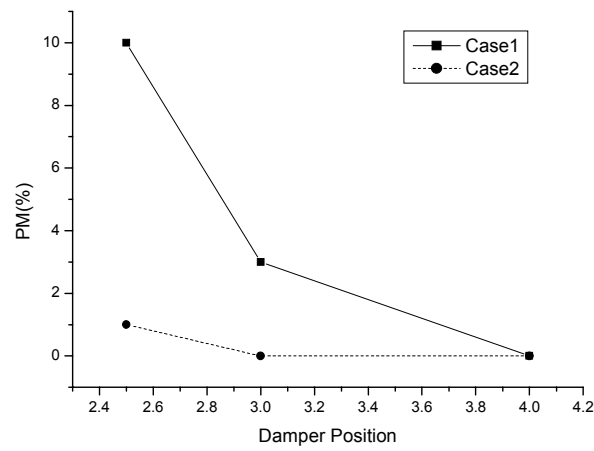
Fig. 4.17 Comparison of NOx

Fig. 4.18은 PM의 배출 결과를 보여준다. 공기가 증가할수록 PM의 배출은 급격히 떨어진다. 경유의 Case 1은 PM의 과다발생을 보여주고 있는데 많은 양의 공기가 들어간 공기 Damper 4의 위치에서 PM의 발생이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉, 일반적인 버너의 사용구간은 damper 4의 위치에서 버너가 구동 될 것이다. 하지만 이때 추가 공급된 공기로 인해 NOx 발생이 크고 배기 손실에 의해 열효율이 떨어지는 것을 Fig. 4.16과 Fig. 4.17에서 알 수 있다. 물 혼합 연료를 사용한 Case 2의 경우에는 공기 damper 2.5에서도 PM의 배출이 거의 없다. 이때 적은 공기로 인해 NOx는 적어지고 열효율은 최대 값을 유지하고 있다. 즉, 일반적으로 버너의 가동 위치는 경유만 사용한 Case1이고, 이때 열 효율은 damper 4에서 78%이다. 물 혼합 연료를 사용한 Case2의 열 효율은 81%로 볼 수 있어 경유 물 혼합일 경우 열효율이 약 4% 향상되었다고 볼 수 있다.

등유의 경우에는 연료 특성상 연소가 잘되므로 과잉 공기가 적더라도 PM의 발생이 적다. 등유는 Case1에서는 damper 3, Case2에서는 damper 2.5에서의 열효율을 비교하는 것이 적절하고, 이때의 열효율은 92%로 같다.



Diesel



Kerosene

Fig. 4.18 Comparison of PM

## V. 結 論

와류 충돌형 혼합장치를 이용하여 제조된 물 혼합 연료를 버너에 적용하여 연소 특성과 배기 특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 혼합정도는 혼합 물 액적의 크기가  $5\sim 10\mu\text{m}$  정도로 미세 폭발에 적절하였다.
- 분무화염 거동은 swirl 유동을 동반하는 분무를 공급함으로써 분사 액적들을 넓게 분포시키고, 물 혼합 액적의 미세 폭발에 의한 2차 미립화로 넓고, 짧은 화염을 형성하였다.
- 연소실 온도는 연소 초기 영역의 급격한 온도 상승과 국부적 온도 상승을 억제하는 특성을 보였다.
- 효율은 물을 12% 혼합한 등유일 때는 큰 차이가 없었지만 경유일 때 약 4%의 향상을 가져왔다.
- 배기 특성은 경유에 물을 12% 혼합한 경우 추가 공기 없이  $\text{NO}_x$  30%, PM 90% 이상의 배기 가스 저감 효과를 나타내었다.

## 参考文献

- [1] S. Kajitani and N. Sawa, "軽油・水(W/O形)乳化燃料に関する研究", 日本機械學會論文集(B編) 56巻531号(1990-11), pp3542~3547, 1990.
- [2] Y. Mizutani and A. Taki, "水乳化燃料噴霧の 燃焼・排出特性と 燃焼機構", 日本機械學會論文集(B編) 47巻424号(昭56.12), pp2386~2391, 1982.
- [3] M.C. Park, B.S. Kim and S.H. Oh, "An Experimental Study on Vaporization and Combustion Behavior for Single Droplets of Water-in-Oil Emulsified Fuels", 한국연소학회지 Vol.5, No.1, pp81~89, 2000.
- [4] K. Kimoto, Y. Owashi and Y. Omae, "加熱面での乳化燃料油滴の蒸発挙動", 日本機械學會論文集(B編) 52巻477号(昭61-5), pp2275~2284, 論文 No.84-0645 A, 1987.
- [5] V.R. Vedruchenko, "The Dynamics of Droplet Transformations in the Flame of a Water-Fuel Oil Emulsion Used as the Fuel for Boiler Installations", Thermal Engineering. Vol.47, No.2, pp156~160, 2000.
- [6] Y. Yoshimoto, M. Tsukahara and T. Murayama, "乳化燃料のミクロ爆發に関する研究", 日本機械學會論文集(B編) 55巻519号(1989-11), pp3538~3543, 論文 No.59-0059 B, 1989.

[7] R.A. Altenkrich and D.O. Evans, "水面に浮遊した燃料の液面燃焼", 日本機械學會論文集(B編) 56巻526号(1990-6), pp1775~1779, 論文 No.89-1076 B, 1990.

[8] J.W. Park, K.Y. Huh and K.H. Park, "Experimental Study on the Combustion Characteristics of Emulsified Diesel in a Rapid Compression and Expansion Machine", Proc Instn Mech Engrs, Vol.214, Part D 05699, pp579~585, 2000.

[9] Mitsubishi Oil.Co.Ltd, "Low-NOx Burner Using Fuel Mixed with Emulsified Water", New Technology & Product, 98-07-007-01, 1998.

[10] S.R. Gollahalli, M.K. nasrullah and J.H. Bhashi, "Combustion and Emission Characteristics of Burning Sprays of a Residual Oil and Its Emulsion with Water", Combustion and Flame 55 pp93~103, 1984.

[11] D.C. Rawlins, G.J. Germane, P.O. Hedman and L.D. Smoot, "Laboratory-Scale Combustion of Coal-Water Mixtures", Combustion and Flame 63 pp59~72, 1986.

[12] D.H. Liu, A.M. Zghoul, Z. Li, B.S. Tan, K.L. Lockwood and R.H. Essenhigh, "High Intensity Combustion of Coal with Water Injection", Combustion and Flame 63 pp49~57, 1986.

[13] H. Jahani and S.R. Gollahalli, "Characteristics of Burned Jet a Fuel and Jet a Fuel-Water Emulsion Sprays", Combustion and Flame 63 pp145~154, 1980.

[14] H. Hiroyasu, M. Arai and K. Nishida, "乳化重質燃料の燃機構に関する研究", 日本機械學會論文集(B編) 48巻430号(昭57.6), pp1182~1189, 1983.

[15] S. Kohketsu, K. Mori, K. Sakai and H. Nakagawa, "Reduction or Exhaust Emission with New Water Injection System in a Diesel Engine", SAE Paper 960033 pp51~58, 1996.

[16] P. Svahn, "NOx Reduction by Direct Water Injection in Wartsila Diesel Medium Speed Diesel Engines", Third Nordic Conference on SOx and NOx from Heat and Power Generation, 1996.

[17] N. Hambright, R.W. Burrahm and V.O. Markworth, "Feasibility of Water Injection for Particulate Removal in Large Turbo charged Diesel Engine", NTIS A minerals research contract report, Bumines OFK 84-82, 1981.

[18] M. Ishida, H. Ueki and D. Sakaguchi, "Prediction of NOx Reduction Rate due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine", SAE Paper 972961 pp27~37, 1997.

[19] E.H. Afify, "Performance Combustion Characteristics and Exhaust Emission of a Direct Injection Diesel Engine using Water/Oil Emulsions as Fuel", ALO 19435, 3E-G, 1985.

[20] Y. Yoshimoto, T. Kuramoto, Z. Li and M. Tsukahara, "Influence of Water Content Ratio on Combustion Fluctuation of Diesel Engine Using Emulsified Fuel", BULLETIN of THE Marine Engineering Society in Japan vol.26, No.1, pp15~23. 1998.

[21] Y. Yoshimoto, M. Tsukahara and T. Kuramoto, "Improvement of BSFC by Reducing Diesel Engine Cooling Losses with Emulsified Fuel", SAE Paper 962022, 1996.

[22] G.B. O'Neel, T.W. Ryan III and R.W. Waytulonis, "Control of Diesel Exhaust Emissions in Underground Coal Mines-Steady-State and Transient Engine Tests with a Five Percent Water-In Fuel Micro emulsion", SAE Paper 830555 pp77~83, 1983.

[23] T.J. Caffatarr, T.W. Ryan III, G.B. O'Neel and R.W. Waytulonis, "Control of Diesel Exhaust Emissions in Underground Coal Mines-Single-Cylinder Engine Optimization for Water-In Fuel Micro emulsion", SAE Paper 830553 pp55~66, 1983.



- [24] G.E. Andrews, K.D. Bartle, S.W. Pang, A.M. Nurein and P.T. Williams, "The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels", SAE Paper 880348 pp1~9, 1988.
- [25] A. Lawson and A. J.Las, "Modified Fuels for Diesel Engines by Application of Unstabilizes Emulsions", SAE Paper 790925 pp46~79, 1979.
- [26] N. Miyamoto, H.Y. Ogawa, J. Wang and K. Yamazaki, "Simultaneous Reductions in Diesel NO<sub>x</sub> and PM Emissions with Aqueous Metal-Salt Solutions Directly Injected into the Combustion Chamber", SAE Paper 961164 pp29~34, 1996.
- [27] Y. Yoshimoto, M. Tsukahara, Z. Li and H. Sano, "Nox Reduction with EGR in a Diesel Engine Using Emulsified Fuel", SAE Paper 982490, 1998.
- [28] R.T. Johnson and J.O. Stoffer, "Performance of Stabilized Diesel Fuels Containing Alcohols and Water in Single and Multicylinder Direct Injection Engines", SAE Paper 830557 pp91~104, 1983.
- [29] N. Khan and S.R. Gollahovli, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Burning Unstabilized Emulsions of Diesel Fuel with Water, Methanol, and Ethanol", SAE Paper 811210 pp27~36, 1981.

## 감사의 글

학부와 석사과정 동안 항상 부족하고 미진한 저를 따뜻한 관심과 사랑으로 지도하시고, 인생의 등불이 되어주신 박권하 교수님에게 머리 숙여 감사 드립니다. 바쁘신 와중에도 귀중한 시간을 내주시어 논문에 대한 충고를 해 주신 조권희, 윤상국 교수님께도 감사 드립니다.

실험실의 만형인 현철이형, 항상 고민 많이 들어준 병두형, 웃음과 즐거움이 넘치던 인석이형, 짧은 시간 많은 것을 가르쳐준 회성이형에게 감사 드리고, 착하고 든든한 동기인 상무, 항상 열심히 사는 석민, 운동 좋아하고 건강한 재혁이, 힘든 일 기꺼이 도와주던 후배 종구, 주용이에게 고마움을 전하고, 앞으로 좋은 일만 있기를 바랍니다. 새로이 대학원 생활을 시작하는 귀염둥이 승우와 이쁜이 인선이에게도 활기찬 석사생활이 되길 바랍니다.

마음이 따뜻하고 푸근한 옆집아저씨 같은 박홍일 원장님, 좋은 얘기 많이 해주시고 도움을 주시던 이화순 교수님, 언제나 밝고 즐거운 모습을 보여주시던 송영호 이사님, 항상 노력하는 모습을 보여주셨던 김재곤 선생님께 감사의 마음을 전하며 하시는 일들 잘 되시길 기원합니다.

대학 신입생 때부터 한결 같은 모습으로 후배를 사랑해주신 듬직한 태형이형, 정훈이형, 즐거울 때, 마음 울적할 때 언제나 있어준 태훈이, 현주, 선자등 동기들, 구박 많이 받아도 늘 따라주던 후배 종구, 병랑이, 영주, 재환이등 모든 그린비 동문인에게 고마움을 전합니다.

바쁜 회사 생활에서도 논문 작성을 위해 배려를 해주신 김영남 사장님, 금명철 박사님, 김의택 이사님, 김영일 이사님과 논문의 완성을 위해 물심양면 도움을 주시고 아껴주신 김종훈, 편혁범, 조기환, 홍보한, 김봉연, 박지영, 김옥선 씨등 모든 회사 동료 여러분께 다시 한번 감사 드립니다.

지금 것 어려운 환경에서도 열심히 사시며 묵묵히 저를 지켜봐 주시던 아버지, 따뜻한 사랑으로 지켜주시던 어머니, 항상 뒤에서 도와주시는 큰 누나, 작은 누나, 동생에게 이루 말할 수 없는 고마움을 전합니다.

짧은 글로는 다 표현하지 못한 친구들, 동기들, 저를 아는 모든 분께 감사 드리며 이 논문을 바칩니다.

2002년 12월 30일

韓 鎭 熙